

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

**MERIVOIMIEN ANTENNIEN SIGNAALI-KOHINASUHTEEN PARANTAMINEN
NATO UHF I JA III+ TAAJUUSALUEILLA**

Sotatekniikan pro gradu

Yliluutnantti
Ilari Lemponen

Sotatieteiden maisterikurssi 7
Merisotalinja

Huhtikuu 2018

MAANPUOLUSTUSKORKEAKOULU

Kurssi Sotatieteiden maisterikurssi 7	Linja Merisotalinja
Tekijä Yliluutnantti Ilari Lemponen	
Tutkielman nimi Merivoimien antennien signaali-kohinasuhteen parantaminen NATO UHF I ja III+ -taajuusalueilla	
Oppiaine johon työ liittyy Sotatekniikka	Säilytyspaikka MPKK:n kurssikirjasto
Aika Huhtikuu 2018	Tekstisivuja 69 Liitesivuja 11
TIIVISTELMÄ <p>Nyky aikaisten tilannekuva- ja johtamisjärjestelmien käyttöönotto on kasvattanut tiedonsiirtokapasiteetin tarvetta. Tiedonsiirtokapasiteettia voidaan kasvattaa joko kasvattamalla käytettävissä olevan taajuuskaistan leveyttä, tai parantamalla signaali-kohinasuhdetta. Signaali-kohinasuhdetta voidaan parantaa joko vähentämällä kohinaa tai kasvattamalla viestiyhteyden vastaanotetun tehon määrää. Kaistanleveyden kasvattaminen ei ole usein mahdollista ja kohinaa esiintyy kaikissa ympäristöissä. Antenniteknisillä ratkaisuilla on mahdollista parantaa yhteyden signaali-kohinasuhdetta käyttämällä voimakkaasti suuntavia antennoja ympäristäteilevien antennien sijaan tai niiden rinnalla.</p> <p>Tutkimusmenetelminä käytettiin kirjallisuustutkimusta ja simulointia. Kirjallisuustutkimuksen avulla määritettiin vertailtavat antennityypit ja niiden parametrit vietiin valittuun simulaatio-ohjelmaan. Simuloinnin skenaariot rakennettiin saariston olosuhteisiin Hangon alueelle.</p> <p>Antennien vertailu suoritettiin laskemalla jokaiselle antennityypille maksimaalinen yhteysvälivaimennus, joka mahdollistaa kaksisuuntaisen liikennöinnin aluksen ja tukiaseman välillä. Yhteyksiä tarkasteltiin myös häiriöolosuhteissa. Tulosten tarkastelu osoittaa, että suunta-antennien käytöllä voidaan parantaa signaali-kohinasuhdetta etenkin NATO UHF III+ -taajuusalueella, jossa antennien pieni koko voi mahdollistaa niiden laajamittaisen käytön aluksilla. Suunta-antennien käyttöä tulisi lisätä, mikäli rahoitus ja antennien fyysinen koko mahdollistavat niiden asentamisen aluksille.</p>	
AVAINSANAT Antenni, UHF, vaimennus	

ADAPTIIVISET ANTENNIT

Sisältö

1.	JOHDANTO	1
1.1.	Tutkimuksen tausta	1
1.2.	Tutkimusongelma.....	3
1.3.	Käsitteet ja määritelmät.....	4
1.4.	Rajaukset.....	4
1.5.	Tutkimusmenetelmät.....	5
1.6.	Lähteet ja lähdekritiikki	6
2.	ANTENNIEN TEORIA	7
2.1.	Antennin peruskäsitteitä.....	7
2.2.	Radiokanava.....	16
2.3.	Mediaanivaimennuksen arviointiin käytettäviä malleja.....	18
2.4.	Shannon-Hartleyn teoreema ja linkkibudjetti	23
2.5.	Yhteenveto	26
3.	ANTENNITYYPIT	27
3.1.	Dipoliantenni.....	27
3.2.	Suunta-antenni.....	29
3.3.	Adaptiivinen antenni	31
3.4.	Kytettävän keilan antenni.....	37
3.5.	Skenaario 1 NATO UHF I	40
3.6.	Skenaario 2 NATO UHF III+	54
3.7.	Häirintätarkastelu	61
3.8.	Yhteenveto	65
4.	JOHTOPÄÄTÖKSET	66
4.1.	Johtopäätökset.....	66
4.2.	Jatkotutkimusaiheet.....	68

LÄHTEET

LIITTEET

MERIVOIMIEN ANTENNIEN SIGNAALI-KOHINASUHTEEN PARANTAMINEN NATO UHF I JA III+ TAAJUUSALUEILLA

1. JOHDANTO

1.1. Tutkimuksen tausta

Nykyajan tietoyhteiskunnassa sodankäynti on siirtymässä enenevässä määrin informaatioulottuvuuteen. Sodan ja taisteluiden voittamiseen pyritään tavanomaisen vaikuttamisen keinojen lisäksi omaamalla informaatioylivoima vastustajaan nähden. Informaatioylivoimalla saavutetaan vastustajaa reaaliaikaisempi tilannekuva, johtaminen ja mahdollistetaan konventionaalista asevaikutusta käyttävien joukkojen tehokkuuden lisääminen. [20]

Sähkömagneettisen spektrin hallinta on entisestään korostunut nykyaikaisessa sodankäynnissä. Kosola ja Solante ilmaisevat sähkömagneettisen spektrin hallinnan seuraavasti:

”Se, joka hallitsee sähkömagneettista spektriä, kykenee voittamaan taistelun. Se, joka ei sitä hallitse, on tuomittu reagoimaan vastustajan toimiin hajanaisin vastatoimenpitein. Sähkömagneettisen spektrin hallitsija näkee ja kuulee sekä kykenee johtamaan. Riistämällä spektrin käyttökyky vastustajalta kyetään tekemään se paitsi sokeaksi ja kuuroksi, myös mykäksi. Tällöin sen lihaksistakaan ei ole sille hyötyä”. [20] s. 9

Valitsin tutkimustyöni aihealueeksi ”LV2020-johtamisjärjestelmäratkaisut – adaptiiviset antennijärjestelmät”. Aihealueen valinta perustui tutkijan haluun syventää omaa osaamistaan radio- ja antennitekniikasta. Tutkimustyön tilaajana toimii Merivoimien esikunnan johtamisjärjestelmäsektori.

Merivoimien tämänhetkiset antennit ovat tällä hetkellä usein ympärisäteileviä antennoja. Osalla aluksista on käytössä mekaanisia suunta-antenneja. Ympärisäteilevien laajakaistaisen antennien keskeisiä haasteita on antennisijoittelun suunnittelu ja rajoitetun tilan myötä syntyvät yksittäisten antennien katvealueet, heikko vahvistus laajan toimintataajuuden vaatimuksen vuoksi ja eri taajuusalueilla toimivien antennien aiheuttamat keskinäishäiriöt. Mekaanisesti suunnattavat laajakaistaiset antennit mahdollistavat tukiaseman mekaanisen seurannan, mutta vaativat erillisen antenniohjauslaitteiston.

Adaptiivisilla antennilla voi olla useita sotilaallisessa mielessä hyviä ominaisuuksia [17]. Adaptiivisen antenniryhmän keilanmuodostus toteutetaan painottamalla signaalin amplituditasoa ja vaihetta antenniryhmän sisällä. Adaptiivinen antenniryhmä mahdollistaa myös säteilykuvion nollakohdan luomisen suuntaan, johon halutaan säteillä mahdollisimman vähän. Antenniryhmän säteilykuvion maksimi- ja nollakohtien määrät ovat riippuvaisia antennielementtien määrästä. Adaptiiviset antennit voivat siis olla vaikeammin tiedusteltavissa ja sähköisen ohjauksen takia liikkuvien tilaajien liittyminen tukiasemaan ei vaadi mekaanista antenniohjainta. [33]

Adaptiivisten antennien teoreettinen pohja on yhteneväinen vaiheohjaukseen perustuvien tutkien teorian kanssa. Vaiheohjaukseen perustuvaa tutkatekniikkaa on ollut käytössä toisesta maailmansodasta lähtien. [5]

Tutkijan aiemmista väärästä käsityksestä poiketen Puolustusvoimien tutkimus- ja kehitystoiminnalla on ollut merkittävä rooli sotilaskäyttöön kehitettävien adaptiivisten antenniratkaisujen kehityksessä Suomessa. Merivoimat oli 2000- luvulla ohjelmistoradioprojektin ja siihen liittyvän adaptiivisen antennidemonstraattorin myötä kehityksen keihäänkärjessä [32].

1.2. Tutkimusongelma

Tämän tutkimuksen tavoitteena on tutkijan riittävien valmiuksien osoittamisen lisäksi kartoittaa keinoja Merivoimien alusten tiedonsiirtokapasiteetin kasvattamiseen. Tiedonsiirtokapasiteettia voidaan kasvattaa kasvattamalla antennien signaali-kohinasuhdetta, vähentämällä kohinaa tai kasvattamalla lähetteen kaistanleveyttä.

Tutkimuksen pääkysymys on: Miten antenniteknisillä ratkaisuilla voidaan kasvattaa Merivoimien alusten tiedonsiirtokapasiteettia NATO UHF I- ja NATO UHF III+ -taajuusalueilla?

Merivoimien uudet tilannekuva- ja johtamisjärjestelmät ovat asettaneet tiedonsiirtoverkot uuden tilanteen eteen. Lähes reaaliaikaisen tilannekuvan lähettäminen ja vastaanottaminen aikajakoisissa verkoissa eri VHF-, UHF-, ja HF- taajuuksilla ei ole täysin ongelmattonta [12]. Merivoimien alusten RF-mittauksissa on havaittu signaali-kohinasuhdetta heikentäviä ilmiöitä, jotka ovat osaltaan uusien järjestelmien aiheuttamia. Antenneille ja kaapeloinnille varatun fyysisen tilan ollessa hyvin rajattua, voi antennikonfiguraation muuttaminen suotuisammaksi olla haastavaa. Lisäksi keskinäishäiriöiden synnyn mekanismi ei välttämättä ole yksiselitteisesti mitattavissa.

Pääkysymyksen tueksi luodaan alakysymyksiä, joihin vastaamalla vastataan itse pääkysymykseen. Jokaiseen alakysymykseen vastaamiselle varataan tutkimuksessa yksi pääluku. Tutkimukselle on laadittu kolme alakysymystä jotka ovat:

1. Mitkä ovat tämänhetkiset tiedonsiirron rajoitteet NATO UHF I ja III+ -taajuusalueilla?
2. Voidaanko suuntaavien antennijärjestelmien käytöllä parantaa tiedonsiirtokapasiteettia NATO UHF I ja III+ taajuusalueilla?

3. Miten suuntaavien antennijärjestelmien käyttö vaikuttaa viestijärjestelmän maksimikantamaan häirintätilantessa?

1.3. Käsitteet ja määritelmät

Tutkimuksessa käsiteltävä taajuusalue määritellään poikkeavasti ITU:n ja IEEE:n määritelmiin nähden. IEEE:n määritelmän mukaisesti VHF-taajuusalue rajoittuu taajuuskaistalle 30 -300 MHz ja UHF-taajuusalue taajuuskaistalle 300 MHz – 1 GHz. Tässä tutkimuksessa käsitellään IEEE:n määritelmistä poiketen NATO:n määrittelemää sotilaalliseen käyttöön varattua NATO UHF I-taajuusaluetta joka rajoittuu taajuuskaistalle 225 – 400 MHz. NATO UHF III+ -taajuusalue rajoittuu taajuuskaistalle 1350 – 2700 MHz.

Kirjallisuudessa esiintyy lukuisia termejä ja määritelmiä vaiheohjatuille antenniryhmille. Yleis-terminä käytetään usein termiä ”*Älykäs antenni – Smart antenna*”, tai ”*Adaptiivinen antenni – Adaptive antenna*”. Adaptiivisella antennilla tarkoitetaan tässä tutkimuksessa vaiheohjattua antenniryhmää, jonka lähetys- ja vastaanotto-ominaisuuksia voidaan muokata algoritmien avulla halutun kaltaiseksi. Antenni itsessään ei ole älykäs, antennin algoritmi on ihmisälyn tuote. [5]

1.4. Rajaukset

Tutkimus rajataan NATO UHF I ja NATO UHF III+ taajuusalueille. Tarkasteltava taajuusalue on 225 – 2700 MHz. Taajuusalue on suhteellisen laaja ja tarkasteluissa skenaariot on laadittu pistetaajuuksille rajauksessa olevan taajuusalueen sisäpuolelle. Tutkimuksessa ei tarkastella sääolojen vaikutusta skenaarioiden tilanteisiin ja säätilan vaikutusta ei ole huomioitu skenaarioissa. Simulaatioissa oletetaan alusten olevan tasaisella pinnalla. Alusten keinunnan ja jyskinän vaikutusta ei ole huomioitu skenaarioissa, mutta sen vaikutusta pohditaan tutkimuksen johtopäätöksissä. Monitie-etenemisen vaikutus signaaliin on rajattu tutkimuksesta pois, joskin ilmiötä voisi kenties olla mahdollista hyödyntää saaristo-olosuhteissa.

Skenaarioiden häiriö- ja häirintätarkasteluissa häirintälähetin on sijoitettu laivalavettiin ja lentokoneeseen. Häirintätarkasteluiden tilanne on staattinen ja niiden tarkoituksena on kuvata häirinnän ja häiriöiden vaikutus valituissa tilanteissa. Tarkasteluissa liike kuvataan vaihtamalla häiritsevän järjestelmän paikkaa suhteessa tarkasteltavaan alukseen ja tukiasemaan. Häirinnän lajeissa keskitytään yleisimpään eli kohinahäirintään. Muita häirinnän lajeja ei tässä tutkimuksessa huomioida. Häirinnän ja häiriöiden teorian esittely ei ole ollut mahdollista tämän tutkimuksen laajuudessa. Häirinnän teoriasta kiinnostuneet lukijat ohjataan tutustumaan esimerkiksi Kosolan ja Solanten teoksiin. [19]

1.5. Tutkimusmenetelmät

Tutkimuksessa kirjallisuustutkimuksella selvitetään yleisesti antenneihin liittyviä perusteita. Antennitekniikkaan liittyvä teoriaperusta esitetään tämän tutkimustyön pääkappaleessa 1. Pääkappaleen 1 tutkimusmenetelmä on kirjallisuustutkimus. Kirjallisuustutkimuksen perusteella tutkija luo käsityksen nykyaikaisen antennitekniikan sovelluksien hyödyntämisestä NATO UHF I ja III+ -taajuusalueille. Kirjallisuustutkimuksen perusteella simuloidaan yksinkertaistetun reaalimaailman tilanteita laskennallisesti.

Malli on käsite, joka liittyy keskeisesti kvantitatiiviseen tutkimukseen. Simulaation validoinnin ja verifiointin kautta testataan luotua mallia esimerkiksi reaalimaailman ongelmaa vastaan. Mallinnuksen abstraktisin muoto on matemaattinen mallinnus, jossa hyödynnetään matemaattisia kaavoja mallin oikeellisuuden todentamiseksi. Tässä tutkimuksessa mallinnusta käytetään vertailun pohjana. Oletetuista mahdollisista antenniratkaisuista luodaan malli, jota testataan olemassa olevia antenneja vastaan. On huomioitava, että malli on aina yksinkertaistus todellisuudesta, ja sen rajoitteet on tuotava ilmi mallin määrittelyssä. [22]

Simulaatioiden toteutukseen käytetään Roger Coudén radioamatööri toimintaan kehittämää Radio Mobile simulaatio-ohjelmaa. Linkkibudjettien laskeminen on tehty käyttämällä Excel-laskentaohjelmaa. Radio Mobile simulaatio-ohjelma asennettiin tutkijan tietokoneelle simulaatioiden suorittamiseksi. Simulaatio-ohjelmaa on mahdollista käyttää selainpohjaisena, mutta sen käyttö todettiin nopeasti kankeaksi, koska osa simulaattorin toiminnoista vaatii ladatun ohjelmistoversion. Lisäksi laskentojen suorittaminen verkkoyhteyden yli oli huomattavan hidasta. Lisäksi Radio Mobile simulaatio-ohjelman täydellisessä versiossa ohjelma hyödyntää esimerkiksi SRTM 3 korkeusaineistoa. [9]

1.6. Lähteet ja lähdekritiikki

Tämän tutkimuksen sähkömagneettisen spektrin ja antennitekniikan perusteiden selvittämiseen on käytetty tieteenalan perusteoksia. Perusteosten lisäksi uusia tutkimustuloksia on pyritty löytämään artikkeleista ja muista tieteellisistä julkaisuista. Tutkimustyöhön on käytetty myös vahvasti käytännönläheisiä ARRL:n (American Relay Radio League) julkaisuja.

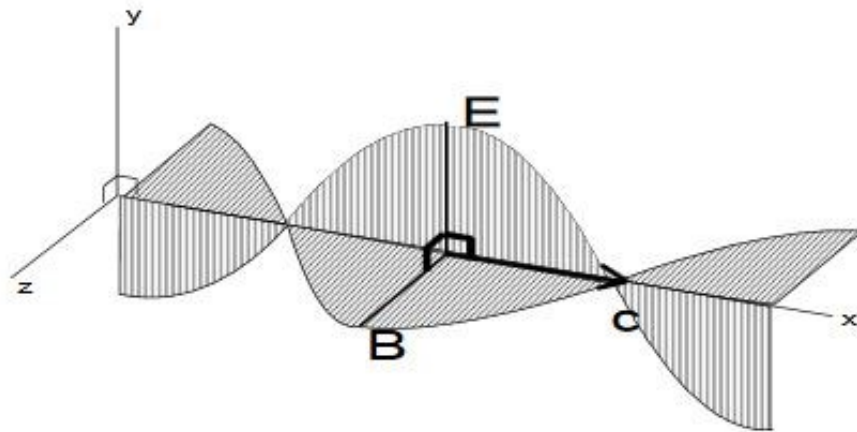
Adaptiivisen antennitekniikan teoreettinen pohja perustuu tieteenalan perusteoksiin ja osin suomalaisen ohjelmistoradioprojektin saatavilla olevaan materiaaliin. Adaptiivisen antennitutkimuksen lähteinä on käytetty perusteosten lisäksi esimerkiksi Maanpuolustuskorkeakoulun Sotatekniikan laitoksen tuottamia julkaisuja ja MATINE:n julkaisuja. Vaikkakin kyseinen lähde-materiaali on peräisin 2000-luvun alkupuolelta, on sen käyttö tutkimusmielessä validia, koska kyseiset tutkimukset käsittelevät suoraan Merivoimien toimintaympäristöä. Adaptiivista antennitekniikkaa koskevaa tutkimusta julkaistiin 2000-luvun ohjelmistoradioprojektissa runsaasti. [33] Adaptiivista antennitekniikkaa Merivoimien näkökulmasta 2010-luvulla on tutkinut esimerkiksi Pihlaja insinööriytyössään, joka käsittelee älyantennien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa.

Keskinäishäiriöitä koskevaa käytännön tutkimusta on toteuttanut muun muassa Forsby tutkimuksessaan, joka koskee Hamina-luokan antennijärjestelmän optimoinnin mahdollisuuksia [12]. Keskinäishäiriöiden vaikutuksia ja syntymekanismeja on tutkittu myös aluksien lähetteitä mittaamalla.

2. ANTENNIEN TEORIA

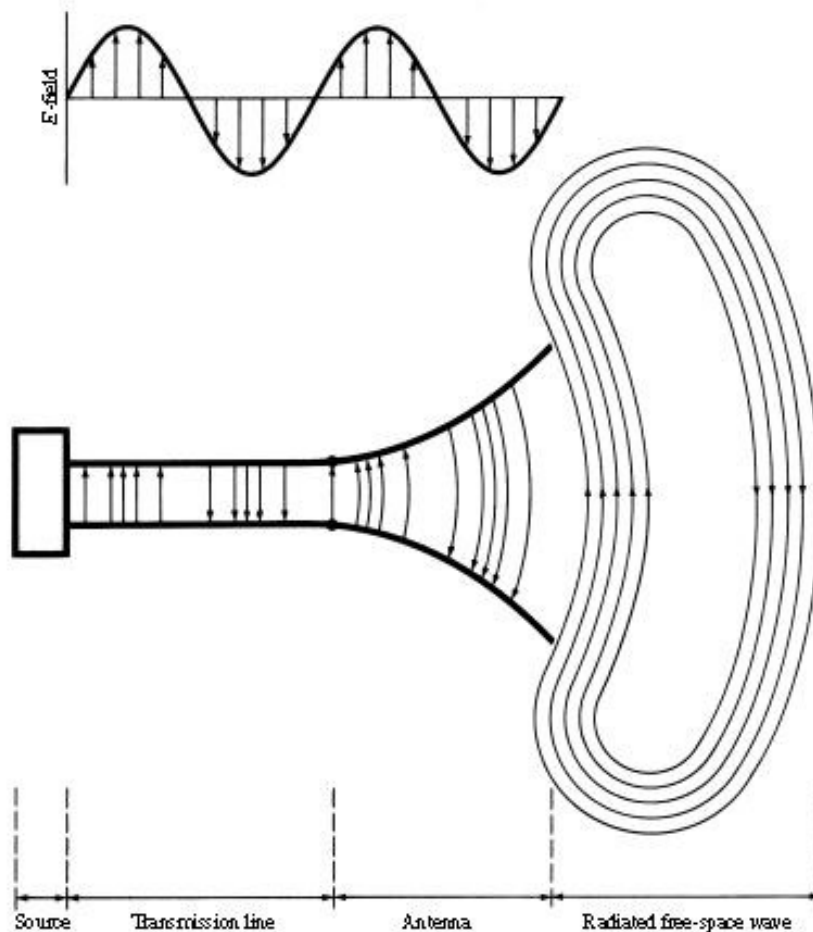
2.1. Antennin peruskäsitteitä

Sähkömagneettinen spektri määritellään Jyri Kosolan ja Tero Solanten mukaan seuraavasti: ”Sähkömagneettinen spektri on ajasta riippuvaa sähkö- ja magneettikentän aaltoliikettä, jota kuvaavat keskeiset suureet ovat amplitudi, taajuus, vaihe, etenemisnopeus ja koherentsisuus. Maxwellin yhtälöiden mukaan säteily etenee, kun muuttuva sähkökenttä synnyttää ajasta riippuvan muuttuvan magneettikentän ja muuttuva magneettikenttä synnyttää ajasta riippuvan sähkökentän.” [20]. Kuvassa 1 esitetään sähkömagneettinen etenevä aalto, jossa sähkö- ja magneettikentän suunnat ovat kohtisuoraan toisiaan vasten.



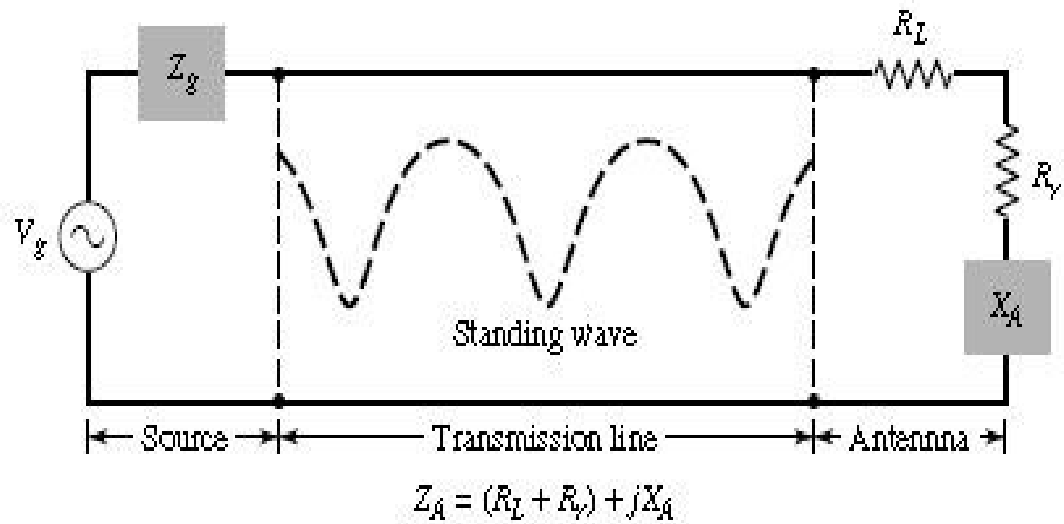
Kuva 1: Sähkömagneettisen säteilyn sähkö- ja magneettikentät [20]

IEEE:n määritelmän mukaan antenni on laite, joka lähettää tai vastaanottaa radioaaltoja. [11] Toisin sanoen antenni on rajapinta vapaan tilan ja lähettimenä toimivan laitteen välillä. Sähkömagneettisen säteilyn etenemissuunta määrittää, onko antenni lähetys- vai vastaanottoantenni. Antennin perusrakenne on esitetty kuvassa 1. Kuvassa esitetään lähetysantenni, jossa on sähkökentän lähde, siirtotie, antenni ja lopputuotteena vapaassa tilassa etenevä aalto. [5] s.15



Kuva 2: Tyypillinen antenni [5] s. 15

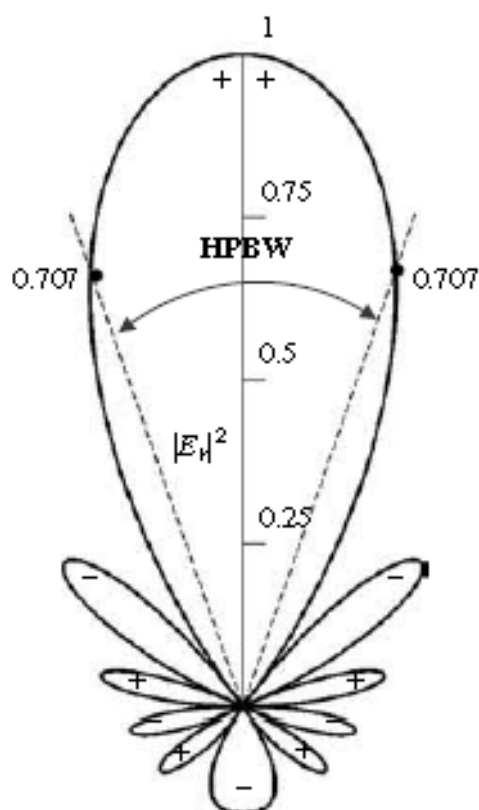
Ideaaliantennissa kaikki lähettimessä muodostettu sähkömagneettinen energia saadaan siirrettyä antennin vastaanottoresistanssiksi. Käytännössä häviöitä aiheuttavat monet tekijät joita esitetään kuvassa 2. Antennin kuorma muodostuu antennin kaapeloinnin resistanssista R_L ja antennin säteilyresistanssista R_r , joka kuvaa antennin säteilemää energiaa. Kaapeloinnissa muodostuvaa interferenssiä kuvataan seisovalla aallolla, joka tarkoittaa käytännössä lähetykseen tarkoitetun energian varastoitumista kaapelointiin tai antenniin. Antennien häviöitä voidaan pienentää vähentämällä resistanssia R_L ja yhteen sovittamalla kaapeloinnin impedanssi antennin impedanssin kanssa. Seisovan aallon suhteen pienentäminen vähentää kaapelointiin ja antenniin varastoitunutta energiaa ja siten parantaa sen hyötysuhdetta. Antennit ovat resiprookkiisia eli vastavuoroisia, ja tämän periaatteen mukaisesti kuvaa 2 voidaan tarkastella myös signaalin vastaanoton näkökulmasta. [5] s. 3-5



Kuva 3: Tyypillisen antennien häviöitä [5]

Nykyaikaisilla antenneilla on energian lähetyksen ja vastaanoton lisäksi muitakin tehtäviä. Kehittyneessä langattomassa järjestelmässä antennin on kyettävä optimoimaan säteilyä tiettyyn suuntaan ja vastaavasti kyettävä vähentämään sitä jostain toisesta suunnasta. Adaptiivisten antennien ohjaus perustuu aina antennia ohjaavaan algoritmiin. Adaptiivisten- tai älyantennien teoria ei sinänsä ole uutta, vaan sitä on käytetty esimerkiksi tutkatekniikassa vuosikymmeniä. Esimerkiksi signaalien vaihemodulointiin perustuvat signaalin suuntausalgoritmit on julkaistu IEEE:n toimesta jo 1960-luvulla. Terminä älyantenni on hieman harhaanjohtava, koska antenni itsessään ei voi olla älykäs, vaan sen ohjausalgoritmin muodostamiseen on tarvittu ihmisälyä. [5]

Antennin säteilykuvio kuvaa antennin ominaisuuksia kulman funktiona. Kaksiulotteisessa säteilykuviossa antennin kolmiulotteisesta normalisoidusta amplituditasosta leikataan osa, ja projisoidaan se tasopinnalle [34]. Tyypillisesti taso on asetettu siten, että säteilyn maksimikohdan arvo on 1. Säteilykuviot voivat kuvata esimerkiksi antennin keilanmuodostusta tai signaalin tehotiheyttä joko lineaarisessa tai logaritmisessa asteikossa. Kuvassa 3 esitetään esimerkki suuntaavan 10-elementtisen antennin kaksiulotteisesta säteilykuvioista. Elementtien etäisyys toisistaan on $d = 0,25\lambda$. Kuvasta on luettavissa lisäksi polarisaation muutos ja pääkeilan leveys 3dB pisteiden mukaan. Antennin keilanleveys on joko säteilykuvien nollakohtien välinen kulma tai 3dB pisteiden välinen kulma. [5][4]



Kuva 4: Antennin kaksiulotteinen säteilykuvio [5]

Antennin lähi- ja kaukokenttä. Sähkömagneettisen aaltorintaman edetessä vapaassa tilassa tapahtuu aaltorintamassa muutoksia. Muutokset voidaan jakaa kolmeen eri tilaan antennin ympärillä. Reaktiivisessa lähikentässä sähkömagneettisen kentän reaktiivinen osa on suurempi kuin säteilevä osa. Säteilevässä lähikentässä kentän reaktiivisella osalla ei ole merkitystä [5]. Säteilevässä lähikentässä magneetti- ja sähkökentät eivät ole kohtisuorassa toisiaan vasten, eikä sähkö- ja magneettikenttien komponenteista ole pääteltävissä toisen komponentin suuntaa. Kaukokentässä sähkömagneettinen aaltorintama etenee tasoaaltona, jossa magneettinen ja sähköinen komponentti ovat kohtisuorassa toisiaan vasten. Kaukokentässä aaltorintamaan vaikuttaa sen voimakkuutta heikentävä etenemisvaimennus [30]. Lähi- ja kaukokenttien kuvauksessa käytetään toisinaan optiikan tutkimuksessa käytettäviä Fresnel:n ja Fraunhofer:n vyöhykkeitä. [16].

Reaktiivisen lähikentän ulkoraja:

$$R < 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

jossa, R = reaktiivisen lähikentän ulkoraja

λ = aallonpituus

D = antennin suurin dimensio [5]

Hyvin lyhyillä antenneilla voidaan käyttää muotoa:

$$R = \lambda/2\pi [5]$$

Säteilevän lähikentän rajat määritellään vastaavasti:

Sisäraja:

$$R \geq 0,62 \sqrt{\frac{D^3}{\lambda}}$$

Ulkoraja:

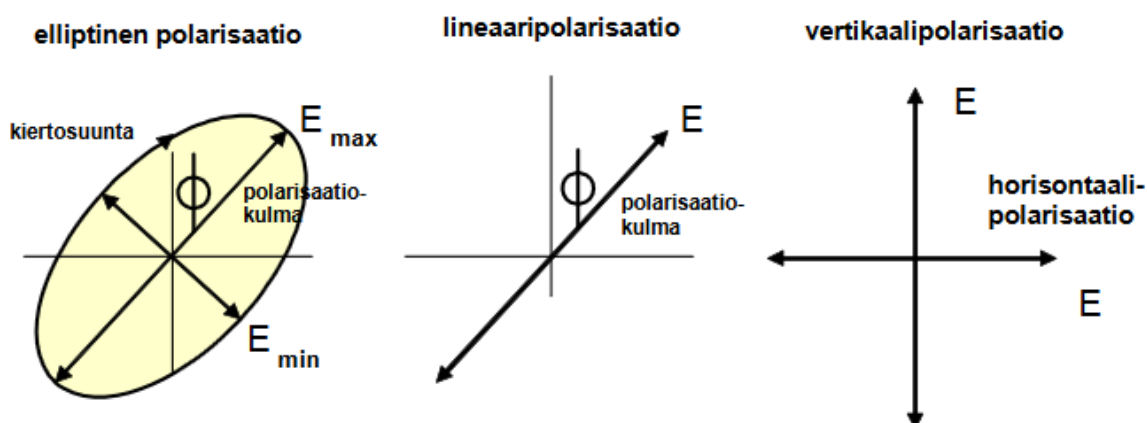
$$R < \frac{2D^2}{\lambda}$$

jossa, R = säteilevän lähikentän ulkoraja antennin pinnasta

D = antennin suurin dimensio [5]

Kaukokentän sisäraja alkaa säteilevän lähikentän ulkorajalta ja jatkuu äärettömyyteen. Yleensä vastaanottimen antenni on lähettimen kaukokentässä, koska esim. 10 MHz taajuudella ja 30 m aallonpituudella metrin pituisen antennin kaukokentän raja muodostuu 0,067 metrin etäisyydelle. [5]

Antennin polarisaatiolla tarkoitetaan sähkökentän suuntaa tasossa. Polarisaatio on suunnan funktio, ja se ilmoitetaan yleensä pääkeilan polarisaationa pääkeilan suunnassa. Polarisaatio voidaan jakaa lineaariseen- ja kiertopolarisaatioon. Lineaarinen polarisaatio jaetaan edelleen vaaka- ja pystypolarisaatioon. Kiertopolarisaatio taas jaetaan oikean- ja vasenkätiseen kiertopolarisaatioon. Kuvassa 2 esitetään polarisaation määrittelevät suureet [20] 43-44



Kuva 5: Sähkömagneettisen säteilyn polarisaatiota määrittelevät suureet [20]

Mikäli antenni vastaanottaa sähkömagneettisen aallon, jonka polarisaatio on sama kuin antennin polarisaatio, tapahtuu antennin sovitus. Jos taas antennin polarisaatio eroaa aallon polarisaatiosta, esiintyy vaimennusta. Polarisaatiovaimennuksen suuruus ilmoitetaan antennin polarisaatiohyötysuhteena [34]. Polarisaatiovaimennuksen maksimi saavutetaan, kun polarisaatiot ovat kohtisuorassa toisiinsa nähden. Muodostuneen kohtisuoran polarisaation eli ristipolarisaation vaimennus on noin 30 dB. Mikäli polarisaatioiden välinen kulma on 45 astetta, polarisaation aiheuttama vaimennus on noin 3 dB. Polarisaatiovaimennus voidaan laskea kaavan 1 käyttämällä. [5]

$$PLF = |\hat{\rho}_w * \hat{\rho}_a|^2 = |\cos \psi_p|^2$$

jossa, PLF = Polarisaatiovaimennus

$\hat{\rho}_w$ = Aallon polarisaation yksikkövektori

$\hat{\rho}_a$ = Antennin polarisaation yksikkövektori

ψ_p = Yksikkövektoreiden välinen kulma [5]

Impedanssi kuvaa vaihtovirtapiirissä virtapiirin aiheuttamaa vastusta [4]. Vaihtovirtapiirissä piirin impedanssi on riippuvainen piirin resistanssin lisäksi kapasitanssin ja induktanssin aiheuttamasta reaktanssista. Impedanssin taajuusriippuvuus aiheutuu kapasitanssin ja induktanssin taajuusriippuvuudesta [5]. Impedanssiero lähetysantennin ja piirin siirtolinjan välillä aiheuttaa tehon heijastumista antennista lähettimeen. Impedanssiero voidaan pienentää sovittamalla siirtolinjaan liitettyjen laitteiden impedanssi toisiinsa. Teholähteeltä siirtyvä maksimiteho saavutetaan, kun antennin ja siirtolinjan häviöt ovat yhtäsuuria teholähteen häviöiden kanssa [5]. Impedansseiltaan sovitetun virtapiirin kuorman maksimiteho on puolet teholähteen maksimitehosta, jolloin toinen puoli tehosta on kyettävä poistamaan teholähteestä esimerkiksi lämpöenergiana [34].

Antennin impedanssi lasketaan kaavalla:

$$Z = R_n + R_r + jX_a$$

jossa, Z = impedanssi

R_n = Antennin säteilyresistanssi

R_r = Antennin häviöresistanssi

jX_a = Impedanssin reaktiivinen osa [5]

Mikäli antenni toimii suunnitellulla taajuudella ja sen impedanssi on sovitettu, antennin kokonaisimpedanssi muodostuu vain antennin säteilyresistanssista R_n . Käytännössä ämänkaltainen antenni voi olla vain ideaaliantenni. Todellisuudessa impedanssin sovittaminen vaatii teholähteen, kaapelonnin ja lähettimien impedanssien sovituksen. Mikäli sovitusta ei toteuteta, teho virtaa takaisin teholähteen suuntaan aiheuttaen häviöitä. Tehon virtausta tehonlähteen suuntaan kuvataan seisovan alloon suhteella. [5]

Antennin suuntaavuus kertoo antennin kyvystä lähettää säteilyä tiettyyn suuntaan [20] 49-50. Suuntaavuus voidaan mieltää maksimitehotiheyden suhteena keskimääräiseen tehotiheyteen. Suuntaavuus ilmoitetaan yleensä suhteessa pääkeilaan. Antennin suuntaavuus on tämän tutkimuksen kannalta yksi keskeisistä suureista. Antennin suuntaavuus voidaan laskea kaavasta 2, jossa tehotiheyden vertailu tapahtuu suhteessa isotrooppiseen säteilijään. [1]

$$D = \frac{U}{U_0} = \frac{4\pi U}{P_{rad}}$$

jossa, D = Antennin suuntaavuus

U_0 = Isotrooppisen säteilijän tehotiheys

U = Keskimääräinen tehotiheys

P_{rad} = Säteilyn kokonaisenergia [5]

Eri antennityyppien suuntaavuuden approksimointiin on olemassa runsaasti kaavoja [20] 49-50. Antennin suuntaavuuden rinnalla käytetään usein antennin vahvistusta, jonka lähtöarvona on antennin syöttöteho. [1]

Antennin vahvistus ottaa huomioon antennissa tapahtuvia häviöitä. Häviöt huomioidaan antennin hyötysuhteen avulla. Vahvistus on antennin tehotehokkuuden suhde isotrooppisen häviöttömän antennin tehotehokkuuteen. Vahvistus ilmoitetaan usein suhteessa isotrooppiseen säteilijään, jonka vahvistus on $1 = 0$ dBi. Vahvistus voidaan laskea hyötysuhteen ja suuntaavuuden tulona seuraavasti. [20]

$$G = \eta_r D$$

jossa, G = Antennin vahvistus

η_r = Antennin hyötysuhde

D = Antennin suuntaavuus [20]

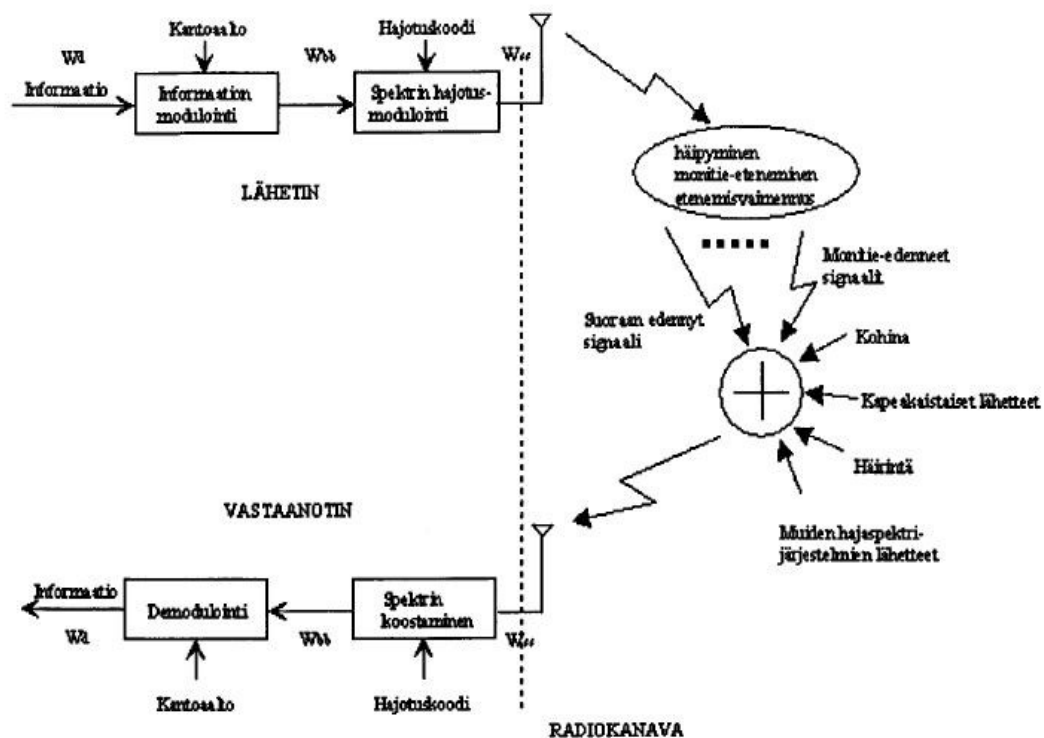
Ideaali-antennin hyötysuhteen ollessa 1, antennin suuntaavuus ja vahvistus ovat yhtä suuret. Käytännössä antennin hyötysuhdetta laskevat monet häviöt, ja vahvistuksen arvo onkin aina suuntaavuutta pienempi [30]. Yllä kuvattu kaava ei ota huomioon antennin impedanssin ja polarisaation epäsovituksista johtuvia häviöitä. Polarisaatio ja impedanssi voidaan lisätä yhtälöön ja laskea antennin absoluuttinen vahvistus. [5]

ITU määrittelee käytetyn kaistanleveyden taajuuskaistan leveydeksi, jossa kaistan ala- ja ylärajan ulkopuolella säteilyn keskimääräinen prosentuaalinen teho ei ylitä $0,5\% \beta/2$ arvoa. β lasketaan keskimääräisestä tehosta prosentteina vertaamalla käytettyä ja tarvittavaa kaistanleveyttä [29]. Toisen määritelmän mukaan antennin kaistanleveys voidaan määritellä taajuuskaistaksi, jolla vahvistus, sovitin keilanleveys tai jokin muu suure on sallittujen rajojen sisällä [30]. Kapeakaistaisia antennia ovat esimerkiksi torviantennit kun taas kartiodipoliantennit ovat laajakaistaisia. Logperiodisilla antennilla kaistanleveys voi olla 90% toimintataajuudesta. Laajakaistaisuus heikentää antennin hyötysuhdetta, koska vain osa antennista toimii lähetettäessä tai vastaanotettaessa tietyllä taajuudella [5].

2.2. Radiokanava

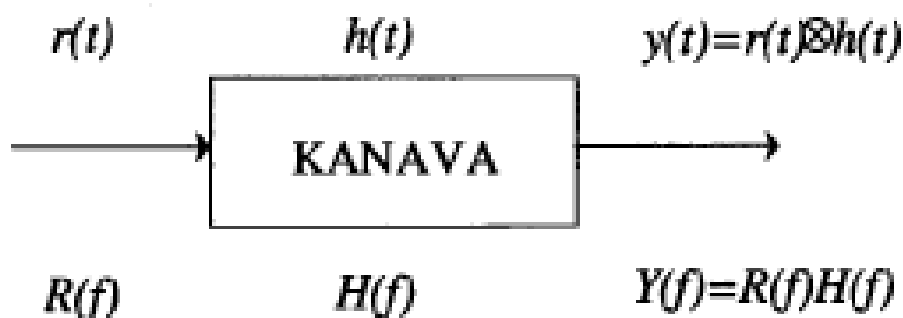
Radiokanavan ominaisuudet ovat määrävässä asemassa minkä tahansa langattoman tiedonsiirtojärjestelmän kehittämiselle. Radiokanavassa tapahtuu tyypillisesti lähetetyn signaalin vaimenemista, sirontaa, taipumista ja heijastumista signaalin edetessä lähettimeltä vastaanottimelle. Edellä mainitut ilmiöt aiheutuvat esimerkiksi rakennuksista, saarista tai liikkuvista kohteista lähetetyn signaalin etenemisreitillä [36]. Radiokanavan ominaisuuksia voidaan tutkia mittamalla todellisessa toimintaympäristössä ja mittauksien jälkeen laboratoriossa. Mittaukset tarkentavat laboratoriokokeiden tuloksia ja laskevat suunniteltavan ja rakennettavan radiojärjestelmän kustannuksia. [14] s.28

Sähkömagneettisen aallon edetessä radiotiellä signaaliin summautuu häiriöitä, monitie-edenneitä komponentteja ja muita lähteitä. Muut lähteet voivat olla laaja- tai kapeakaistaisia. Esimerkiksi VHF-lähteeseen voi summautua HF-lähteen harmonisia monikertoja. Radiojärjestelmän suorituskykyä heikentävät myös laitteiden teknisistä ominaisuuksista aiheutuvat virheet ja epätarkkuudet. Kuvassa 10 esitetään radiokanavan kokonaisvaikutus lähetettyyn signaaliin. [14] 5-6



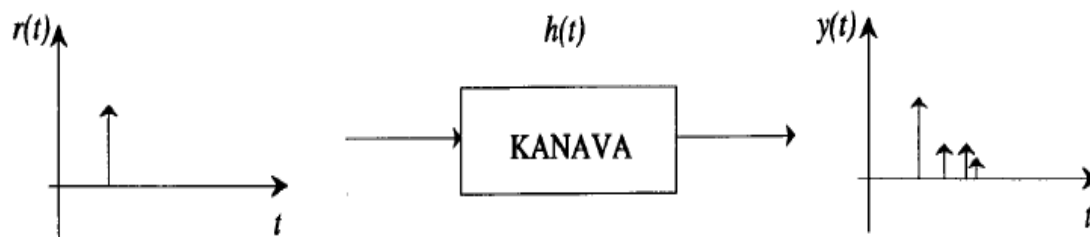
Kuva 6:

Radiokanava on tunnettu, mikäli joko sen impulssivaste tai siirtofunktio tunnetaan. Impulssivaste ja siirtofunktio muodostavat Fourier-muunnosparin. Fyysisen radiokanavan impulssivaste on määritettävissä mittaamalla ja mittausten perusteella voidaan laskea kanavan siirtofunktio. Kuvassa 6 esitetään radiokanavan vaikutus etenevään signaaliin. Kuvassa $r(t)$ kuvaa lähetettyä signaalia. Vastaanotettu signaali $y(t)$ lasketaan lähetetyn signaalin ja kanavan impulssivasteen $h(t)$ konvoluutiona. Kanavan siirtofunktio $H(f)$ saadaan kanavan taajuustason vasteesta $Y(f)$, kun lähetetyn signaalin Fourier-muunnos $R(f)$ tunnetaan. Mikäli lähetettävä signaali on impulssimainen, saadaan impulssivaste suoraan vastaanotetusta signaalista $y(t)$. [14] 2-10



Kuva 7: Radiokanavan vaikutus etenevään signaaliin [14]

Radiokanavan vastaanotetun impulssin tehotasosta voidaan määrittää kanavan todellinen etenemisvaimennus. Todellisen radiokanavan impulssivasteesta vastaanotetaan aina myös vääristyneitä ja viivästyneitä impulsseja. Vääristyneitä ja viivästyneitä komponentteja kutsutaan radiokanavan monitie-komponenteiksi, ja niitä voidaan hyödyntää monitie-etenemistä hyväksikäyttävien radioiden avulla. Radiokanava ei ole ajan suhteen staattinen, vaan se muuttuu ajan kuluessa. Aikavariantissa radiokanavassa monitie-komponenttien tehotasot ja viiveajat muuttuvat ajan funktiona. Kuvassa 9 esitetään radiokanavan tyypillinen vaikutus yksittäiseen impulssiin. [14] 2-10



Kuva 8: Radiokanavan tyypillinen vaikutus yksittäiseen impulssiin [14]

2.3. Mediaanivaimennuksen arviointiin käytettäviä malleja

Radioaaltojen mallintaminen täysin realistisesti on erittäin haastavaa tai jopa mahdotonta [21].
 s.5. Radioyhteyksien mediaanivaimennuksen arviointiin on olemassa matemaattisia malleja. Osa malleista pyrkii yleispätevyyteen ja osa on hyvinkin alueellisesti tai taajuuden suhteen spesifisiä. Mediaanivaimennusmalleja kehitetään jatkuvasti, ja niissä yhdistyvät teoria ja empiiriset mittaushavainnot.

Vapaan tilan vaimennus. Edetessään väliaineessa sähkömagneettinen säteily vaimenee. Radioaallon etenemisen aikana tapahtuvaa mediaanivaimennusta voidaan arvioida eri tavoilla. Lähteessä 20 on kuvattu signaalin yleinen etenemisvaimennus seuraavasti:

$$L = 10 \log \left[S_0 * \left(\frac{R}{R_0} \right)^\alpha \right]$$

, jossa L = vaimennus

S_0 = Signaalin taso lähettimessä etäisyydellä R_0

α = etenemisen olosuhteista ja taajuudesta riippuvainen kerroin [20]

Termien S_0 , R_0 , ja α määrittäminen on usein mitattava tapauskohtaisesti. Etenemisvaimennuksen estimointiin onkin kehitetty muita yleisiä malleja. Kokeellisia malleja ovat esimerkiksi kaksite- tai Plane Earth-malli ja Eglin etenismalli. [20]

Aallon edetessä tyhjiössä tai antennien ollessa toistensa näkyvissä voidaan käyttää vapaan tilan vaimennusta arvioitaessa signaalin etenemisvaimennusta. Signaalin etenemisvaimennus L kuvaa aallon etenemisestä johtuvaa tehotiheyden laskua aallon levitessä laajemmalle alueelle. Antennien ollessa toistensa näkyvissä etenemisvaimennuksen arviointiin voidaan käyttää vapaan tilan vaimennusta, mikäli Fresnell:n ensimmäinen vyöhyke on vapaa esteistä [20] 109-111. Vapaan tilan vaimennus lasketaan kaavasta:

$$L_f = \left(\frac{4\pi r}{\lambda} \right)^2$$

jossa L_f = Vapaan tilan vaimennus

r = Etäisyys metreinä

λ = Aallonpituus

Vapaan tilan vaimennus voidaan laskea desibeleinä seuraavasti:

$$L_f = 32,4 + 20 * \log(f_{MHz}) + 20 * \log(R_{Km})$$

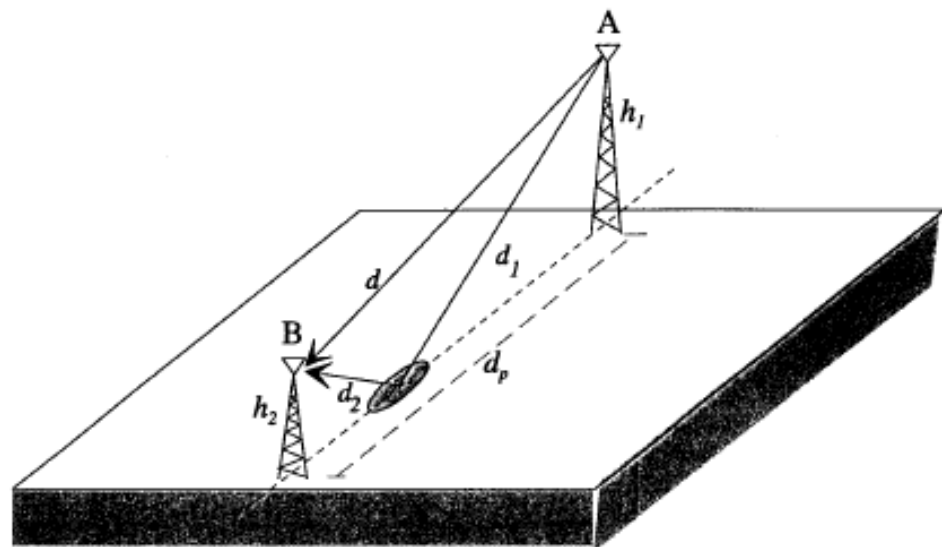
jossa, L_f = Vapaan tilan vaimennus desibeleinä

f_{MHz} = Taajuus megahertseinä

R_{Km} = Etäisyys kilometreinä [20] 109-111

Kaksitiemalli. Merivoimien toimintaympäristön kanavamalleista on saatavilla varsin vähän julkista tutkimustietoa. MATINE:n julkaisu vuosilta 1998-1999 Merivoimien esikunnalle toteutetuista kanavamittauksista antaa kuitenkin kohtalaisen kuvan toimintaympäristön haasteellisesta luonteesta [14]. MATINE:n julkaisussa saaristotyypejä kuvaillaan yleisellä tasolla, eikä se sisällä tarkkoja mittausarvoja.

Merivoimien toimintaympäristö muodostuu avomerestä ja epäsäännöllisestä rikkonaisesta saaristosta. Radiokanavan etenemisvaimennuksen suurusluokan arviointiin voidaan käyttää erilaisia etenemisvaimennusmalleja. Veden päällä tapahtuvan etenemisvaimennuksen arviointiin voidaan käyttää esimerkiksi kaksitiemallia. Kuvassa 11 esitetään kaksitiekanavamallin periaatekuva. [14] s. 21 Kaksitiemallista käytetään yleisemmin nimitystä Plane Earth-malli [20].



Kuva 9: Kaksitiekanavamallin periaatekuva [14] s.21

Kaksitiemallissa käsitellään etenevää aaltoa kahdella komponentilla, joista toinen etenee näköyhteydellä ja toinen heijastuu veden pinnasta. Mallista saadaan laskettua taajuudesta ja antennien korkeudesta riippuva säännöllinen häipymäkuvio, joka summaa vastaanotetun tehon suoraan edenneestä aallosta ja heijastuneesta aallon osasta. Kaksitiemallin etenemisvaimennuksen laskukaava on muotoa:

$$P_r = 4P_t \left(\frac{\lambda}{4d\pi} \right)^2 * G_t G_r \sin^2 \left(\frac{2\pi h_r h_t}{\lambda d} \right)$$

jossa,

P_r = Vastaanotettu teho

P_t = Lähetysteho

d = Etäisyys

G_t = Lähetysantennin vahvistus

G_r = Vastaanottinantennin vahvistus

h_t = Lähettimen antennikorkeus

h_r = Vastaanottimen antennikorkeus [14] s.15

Signaalin vastaanotossa kaksitiemalli ennustaa häipymäkuopan syntymisen alueelle, jossa suoraan edennyt aalto ja vedestä heijastunut aalto ovat toisiinsa nähden 180° vaiheessa. Signaalien vaihe-eron ollessa 180° ne summautuvat destruktiivisesti. Kaksitiemallin avulla voidaan suunnitella yhteyksiä siten, että häipymäkuoppien vaikutus jää mahdollisimman pieneksi. Etäisyyden kasvaessa suoraan edenneen ja heijastuneen signaalin vaiheet lähestyvät toisiaan ja häipymäkuopat katoavat. Etäisyyden edelleen kasvaessa signaalin vaimeneminen toteutuu vapaan tilan vaimennuksen mukaisesti. Etenemisvaimennuksen taitekohta muodostuu pisteeseen, jossa Fresnell:n ensimmäinen vyöhyke saavuttaa heijastuspinnan etäisyyden. [14] 15-17 Tämä etäisyys on laskettavissa yhtälöstä:

$$d_{Kn} = \frac{1}{\lambda} \sqrt{\Sigma^2 - \Delta^2} - 2(\Sigma^2 + \Delta^2) \left(\frac{\lambda}{2} \right)^2 + \left(\frac{\lambda}{2} \right)^4$$

jossa, $\Sigma = h_r + h_t$

$$\Delta = h_r - h_t$$

d_{Kn} = Taitekohdan etäisyys vastaanottimesta [14] 15-17

Kaksitiemallia voidaan käyttää etenemisvaimennuksen arviointiin, mikäli yhteysetäisyydet ovat noin kahdenkymmenen kilometrin luokkaa, koska malli ei huomioi maan kaareutumista. Saarien ja muiden esteiden aiheuttama lisävaimennus on tarkasteltava erikseen huomioon linkkibudjettia laskettaessa. Maapallon kaareutumisen vaikutus kasvaa pidemmällä yhteysetäisyyksillä ja se näyttäytyy tarpeena nostaa antennin korkeutta. Käytännössä saariston mallintamien tarkkuudella, jossa liikkuva tilaaja voisi ennakoida yhteyden laatua on varsin haastavaa. Merivoimien kanavamittausten julkisen raportin perusteella on tulkittavissa, että yhtenäinen kanavamalli ei ole helposti luotavissa. Erilaisia saaristotyyppejä oli erotettavissa mittausdatasta, mutta niiden keskiarvottaminen ei anna tarkkaa kuvaa todellisesta kanavan luonteesta. Kanavatyyppejä tarkasteltiin lopulta kolmena kokonaisuutena, jossa huomioitiin saaristotyyppi, vuodenaika ja etäisyys. Näiden kolmen kokonaisuuden yhdistelmänä kyettiin tarkastelemaan radiokanavaa kokonaisuutena. [14]

ITM-etenemismalli. ITM (Irregular Terrain Model) -etenemismallia voidaan käyttää radioaallon etenemisvaimennuksen arviointiin yli 1 km etäisyyksillä 20 MHz – 20 GHz taajuusalueella. ITM-etenemismalli tunnetaan myös nimellä Longley-Rice-malli kehittäjiensä mukaan. Etene-mismalli julkaistiin ensimmäisen kerran vuonna 1968 ja sen algoritmeihin on tehty sittemmin parannuksia [15]. ITM-mallin lähdekoodi on saatavissa lähteestä 12 [15]. ITM-etenemismalli ennustaa yhteyden mediaanivaimennusta etäisyyden funktiona, ja ottaa arvioi maastosta aiheutuvaa lisävaimennusta. ITM-etenemismallia käytetään edelleen simulaatio-ohjelmissa mediaanivaimennuksen arviointiin. Tässä tutkimuksessa käytettävä Radio Mobile –simulaattori perustuu ITM-etenemismalliin. ITM-etenemismallia käytetään edelleen myös ITU:n standardien pohjana, esimerkiksi mikroaaltojen etenemisvaimennuksen tarkasteluun ja sen on todettu vastaavan kohtalaisen tarkasti kenttäolosuhteissa suoritettuja mittauksia [18]. [24]

2.4. Shannon-Hartleyn teoreema ja linkkibudjetti

Shannon-Hartleyn teoreema kuvaa suurinta teoriassa siirrettävää informaatiomäärää, joka riippuu vain kaistanleveydestä ja signaali-kohinasuhteesta. Shannon-Hartleyn teoreema kuvaa kanavan maksimikapasiteetin ylärajan keskiarvolähetysteholla olosuhteissa, joissa esiintyy kohinaa. Kuvassa 10 esitetään Shannon-Hartleyn teoreeman mukainen kapasiteetti signaali-kohinasuhteen funktiona [20] 98-99. Shannon-Hartleyn teoreema voidaan esittää muodossa:

$$C = B \log_2 \left(1 + \frac{S}{N} \right)$$

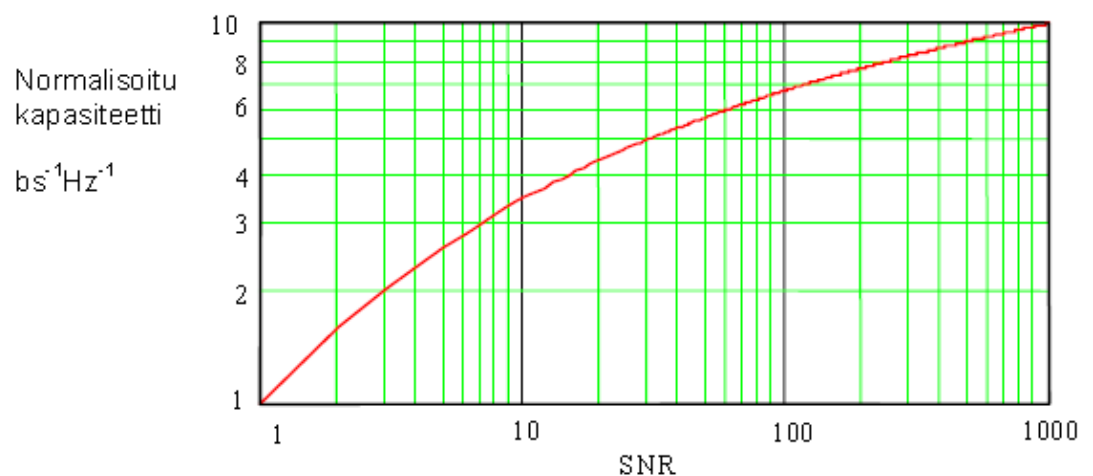
, jossa

C = kanavan maksimikapasiteetti bitteinä sekunnissa

B = Kaistanleveys hertseissä

S = Vastaanotettu teho wateissa

N = Gaussinen kohina [20] s. 99



Kuva 10: Shannonin teoreeman mukainen kapasiteetti signaali-kohinasuhteen funktiona [20] s. 99

Shannon-Hartleyn teoreeman mukaisesti kanavan kapasiteettia voidaan kasvattaa joko kasvatamalla kaistanleveyttä, tai vastaavasti parantamalla signaali-kohinasuhdetta. Käytetty kaistanleveys vaikuttaa kuitenkin myös kohinatason suuruuteen. Käytettäessä äärettömän laajaa kaistaa pienintä mahdollista virheettömän kommunikoinnin rajaa kutsutaan Shannonin rajaksi. Shannonin raja, desibeleissä laskettuna -1,59, voidaan esittää muodossa:

$$\frac{E_b}{N_0} = \frac{1}{\log_2(e)} = 0,69$$

, jossa E_b = Signaalienergia

N_0 = Kohinatehoitiheys [20] s. 100

Edellisissä kappaleissa ja luvuissa on kuvattu signaalin etenemiseen ja antennien perusominaisuuksiin olennaisesti liittyviä ominaisuuksia ja vakioita. Viestijärjestelmän suunnittelussa olosuhteiden ja viestijärjestelmän toimilaitteiden yhdistäminen suunnitellaan linkkibudjetin avulla. Linkkibudjetin tarkastelu voidaan elektronisen häirinnän tarkastelujen tapaan toteuttaa tehotarkasteluina. Tehotarkastelussa vastaanottimeen saapuva teho on riippuvainen lähettävän antennin tehosta ja antennin vahvistuksesta. Lähettävässä viestijärjestelmässä tapahtuu häviöitä ja signaalin edetessä siihen kohdistuu kanavariippuvaista etenemisvaimennusta. Vastaanottimessa signaaliin vaikuttaa edelleen antennin vahvistus ja järjestelmän tehohäviöt. Viestijärjestelmän tehobudjetti voidaan kirjoittaa muotoon: [20] 104-105

$$P_r = P_t + G_t - L_t - L_r + G_r - L_r$$

,jossa P_r = vastaanottimeen saapuva teho

P_t = Lähetysteho

G_t = Lähetysantennin vahvistus

L_t = Lähettimen tehohäviö

L_r = Etenemisvaimennus

G_r = Vastaanottimen vahvistus

L_r = Vastaanottimen tehohäviö [20] s. 104

Viestijärjestelmän pienin hyväksyttävä teho on riippuvainen kohinatasosta ja pienimmästä hyväksyttävästä signaali-kohinasuhteesta. Viestijärjestelmä on mitoittava teholtaan siten, että signaalin mahdollinen häipyminen ja sotilassovelluksissa häirintä, kyetään kompensoimaan. Kompensointi toteutetaan lisäämällä edellä mainittuun yhtälöön häipymistä ja häirintää kuvaavat termit. Käytännössä häipymisen ja häirinnän huomioiminen tehotarkastelussa tarkoittaa tehojen kasvattamista tai vahvistuksen arvon lisäämistä. Viestijärjestelmän tehobudjetti voidaan kirjoittaa muotoon: [20] 104-105

$$P_r = P_t + G_t - L_t - L_r + G_r - L_r = SNR_{min} + N + M_F + M_J$$

, jossa SNR_{min} = Pienin sallittu signaali-kohinasuhde

N = kohina

M_F = Häipymismarginaali

M_J = Häirintämarginaali [20] 104-105

Viestijärjestelmän suunnittelussa linkkibudjetti on usein kompromissi budjetin eri osatekijöiden kesken [36]. Yleensä linkkibudjetin laskemisella pyritään määrittämään järjestelmän lähetysteho tai antennien vahvistus määritetyltä etäisyydeltä. Järjestelmän toimintaetäisyyden määrittäminen on ensiarvoisen tärkeää, koska vaimennus vaikuttaa etenevään aaltoon voimakkaasti etenkin yli 300 MHz taajuuksia käytettäessä, jolloin käytännössä vaaditaan antenneilta näköyhteysreitti toisiinsa nähden [20] s.63. Tässä tutkimuksessa linkkibudjettia tarkastellaan ensin laitteiden suorituskyvyn näkökulmasta ja sen jälkeen määritetään marginaalit häipymiselle ja häirinnälle. Linkkibudjettiin vaikuttavat edellä kuvattujen antennien ja lähettimien tehohäviöiden lisäksi järjestelmien muut häviöt. Esimerkiksi antennikaapeleiden pituudesta johtuva vaimennus kasvaa korkeammilla taajuuksilla, joten pitkiä kappelilinjoja tulisi välttää mikäli mahdollista.

2.5. Yhteenveto

Tähän pääkappaleeseen on koottu joitain tämän tutkimuksen kannalta tärkeitä perusteita, jotka vaikuttavat keskeisesti antennin toimintaan ja tiedonsiirtoon tai tiedonsiirtojärjestelmän suunnitteluun. Radiokanavan siirtotien vaikutusta etenevään signaaliin on pyritty selvittämään kuvailemalla erilaisia etenemis- ja vaimenemismalleja. Vaimenemismalleista vapaan tilan vaimennus on suoraviivaisin ja helpoin ratkaisu etenemisvaimennuksen arviointiin, mikäli antenit ovat radiohorisontin sisällä toistensa näkyvissä. Varsinaisen viestijärjestelmän ominaisuudet määrittävät radiokanavan ominaisuuksien kautta ja jalostuvat suunnittelupöydällä ja simulaatioissa mahdollisiksi laite- ja antenniratkaisuiksi. Seuraavassa pääluvussa siirrytään Merivoimille tyypillisten antennien kuvauksen kautta tutkimaan niiden toimintaa simulaatio-ympäristössä.

3. ANTENNITYYPIT

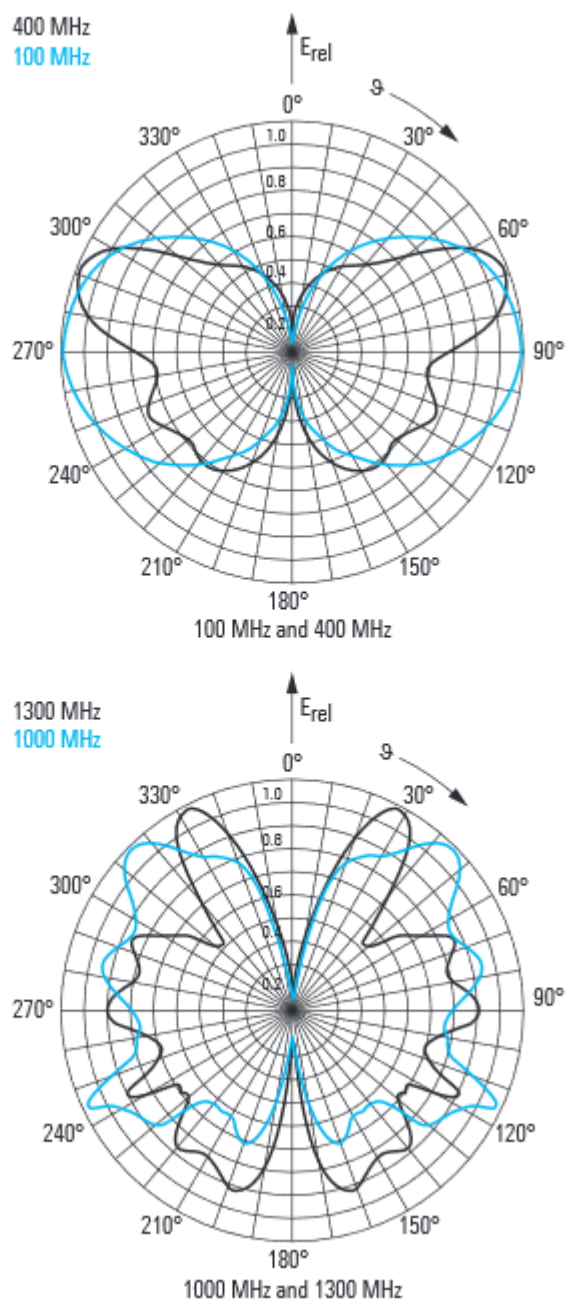
3.1. Dipoliantenni

Merivoimien aluksilla on käytössä runsaasti VHF- ja UHF-taajuusalueiden dipoliantenneja. Tyypillinen aluksella käytettävä antenni on esimerkiksi Rhode & Schwartz:n ympärisäteilevä VHF/UHF-taajuusalueen HKO14-antenni. HKO14 valmistajan ilmoittama taajuusalue on 100MHz – 1,3Ghz. Antenni on tarkoitettu vaativiin olosuhteisiin ja se on suunniteltu ympärivuotiseen käyttöön alusolosuhteissa. HKO14 antennityppi on koaksiaalinen dipoliantenni, jolloin antennissa on syöttölinja ja kaksi lähetinelementteinä toimivaa johdinta. [28] Kuvassa 11 esitetään edellä kuvattu antenni tyypillisessä ympäristössä aluksella [31].



Kuva 11: Rhode & Schwarz HKO14-antenni [31]

Laajan toiminnallisen taajuusalueen omaaville ympärisäteileville antenneille on lähtökohtaisesti pieni vahvistus [16]. HKO14:n antennivahvistus on valmistajan mukaan tyypillisesti 2dBi. Antennivahvistus muuttuu taajuuden muuttuessa, joten ilmoitettu vahvistus lienee lähellä antennin maksimivahvistusta. Antennin säteilykuvio on horisontaalitasossa ympärisäteilevä, ja säteilykuvio muuttuu taajuutta muutettaessa. Antennin valmistajan laatimat säteilykuviot 100MHz, 400 MHz, 1Gz ja 1,3GHz taajuuksilla on kuvattu kuvassa 12. [28]



Kuva 12: Rhode & Schwarz HKO14 dipoliantennin säteilykuvio [28]

3.2. Suunta-antenni

Suunta-antennilla tarkoitetaan antennia, joka voidaan suunnata vastaanottimeen [16]. Merivoimien sovelluksissa suuntaaminen tapahtuu mekaanisesti kääntämällä antennia haluttuun suuntaan. Suunta-antennit ovat tyypillisesti log-periodisia VHF/UHF-alueen antennia, jotka on suunniteltu pääsääntöisesti VHF-taajuusalueelle ja UHF-alueen alaosaan. Mekaaninen suunta-antenni vaatii toimiakseen pyörityskoneiston ja ohjelman, jolla liikkuva asema pitää antennin oikeassa suunnassa. Mekaaninen suunta-antenni vaatii säännöllistä huoltoa ja sen suuret dimensiot VHF/UHF-taajuusalueella voivat estää useiden antennien asentamisen alukselle [25]. Kuvassa 13 esitetään mekaanisesti suunnattava Aerial ALO1A-antenni. [31]



Kuva 13: Aerial ALO1A Antenni [31]

Log-periodisia antennia on saatavilla VHF/UHF-taajuusalueelle ja niistä voidaan muodostaa antenniryhmiä. Merivoimien ADANT-antennitutkimuksessa ensimmäinen adaptiivinen antenniryhmä suunniteltiin toimivan usealla log-periodisella antennilla. Sitten päädyttiin kuitenkin ratkaisuun, jossa antennielementit olivat dipoliantenneja. Log-periodisilla antennilla antenniryhmä olisi ilmeisesti ollut toteutettavissa, mutta se olisi fyysisen kokonsa puolesta melko suuri asennettavaksi alukselle. Log-periodisilla antennilla on dipoliantenneja suurempi vahvistus pääkeilan suuntaan. Taulukossa 1 esitettyssä Aerial:n log-periodeisessa antennissa vahvistus on 7dBi. Antennien vahvistus muuttuu toimintataajuuden mukaan ja valmistaja ilmoittaa usein suurimman saavutettavan vahvistuksen arvon. Taulukon 1 antennista havaitaan myös, että se on laajakaistainen ja fyysisiltä mitoiltaan kohtalaisen suuri.

Taulukko1: Aerial log-periodisen antennin teknisiä tietoja [2]

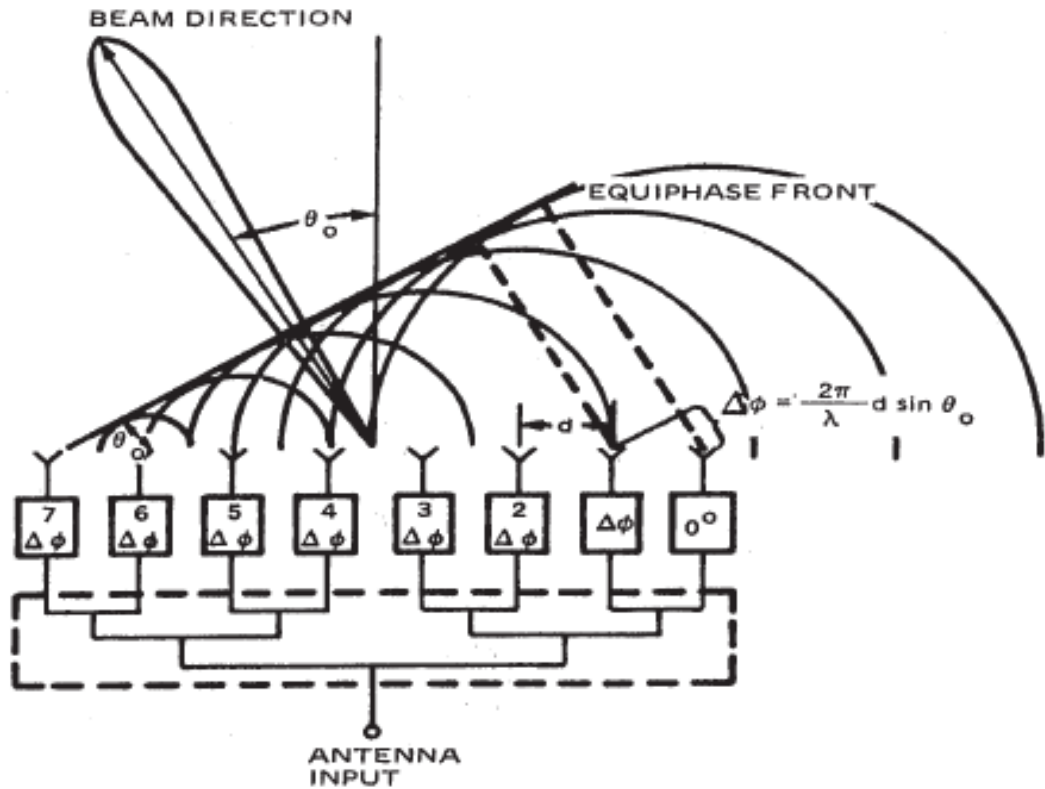
Type	LPD120-500
Frequency	120...500 MHz
Bandwidth	380 MHz
Impedance	50 Ω DC grounded
VSWR	2,0 typical
Polarisation	Horizontal or Vertical
Gain	7 dBi
E-plane 3 dB beamwidth	75°
H-plane 3 dB beamwidth	110°
Electrical downtilt	None
Front to back ratio	15 dB typical
Max. Continuous power	300 W
RF-connector	N
Operational windspeed	40 m/s (default)
Survival windspeed	55 m/s (default)
Wind area	0,2 m ²
Dimensions (H x W x D)	1200x1200x160 mm
Weight	10,0 kg (antenna)
Mounting diameter	Ø 30...115 mm pipe
Materials	Aluminium Glassfiber Glass reinforced PE
Options	Elements detachable.

3.3. Adaptiivinen antenni

Adaptiivisille antennille on olemassa useita eri määritelmiä kirjallisuudessa. ITU:n määritelmän mukaisesti adaptiiviset antennit ovat antenniryhmiä, joiden keilanmuodostusta voidaan säädellä ohjelmallisesti [1]. Useissa lähteissä käytetään yleisesti termiä ”älyantenni” kuvaamaan antennia, jota ohjataan algoritmeilla. Älyantennien alakategorioihin lasketaan adaptiiviset antennit ja niiden sovellukset sekä monitie-etenemistä hyödyntävät antennit [26]. Adaptiivisten antennien teoria pohjautuu vaiheohjauksen tekniikkaan, jonka tietokoneiden lisääntynyt laskentateho on tehnyt riittäväksi. Terminä adaptiivinen antennijärjestelmä on esitetty jo esimerkiksi IEEE:n julkaisussa vuonna 1967 kuvaamaan antenniryhmää, jolla on tieto lähteen suunnasta ja taajuudesta, mutta ei kohinatasosta [35].

Adaptiivisten antenniryhmien käyttöä on tutkittu myös Maavoimissa. MATINE:a on laatinut joitain tutkimuksia Maavoimien kontekstissa liittyen esimerkiksi adaptiivisten antennien kanavarauusprotokolliin. [6] Adaptiivisten antennien potentiaali on huomioitu myös laajemmin esimerkiksi arvioitaessa tulevaa sotateknistä kehitystä [17] 64-65.

Adaptiivisella antenniryhmällä voi olla sotilaallisessa käytössä monia positiivisia ominaisuuksia. Adaptiiviset antennit kykenevät mukautumaan radiokanavan vallitseviin olosuhteisiin, kuten häirintään, kohinaan ja monitie-etenemiseen. Adaptiivisten antennien käyttö yhdistettynä digitaaliseen keilanmuodostukseen ja adaptiivisiin antennialgoritmeihin, tuottavat pidemmän ja häiriöttömämmän yhteysvälin. Adaptiivisilla antennilla on elektronisen sodankäynnin näkökulmasta varsin hyviä ominaisuuksia. Tahallisen häirinnän vaikutusta voidaan saada vähennettyä joko luomalla häirinnän suuntaan nollakohta tai kapeampien pääkeilojen vahvistuksen kasvun kautta. [33] Adaptiivisen antenniryhmän säteilykuvio luodaan painottamalla signaalin vaihetta ja amplitudia antenniryhmän sisällä [13]. Adaptiivisten antennien toiminta perustuu vaiheohjaukseen, jolla luodaan keilakuvio haluttuun suuntaan. Adaptiivinen antenniryhmä vaatii toimiakseen signaalinkäsittelylaitteiston. Kuvassa 6 esitetään lineaarisen antennielementti-ryhmän keilanmuodostuksen periaate. [34]



Kuva 14: Lineaarisen antenniryhmän keilanmuodostuksen periaate [34]

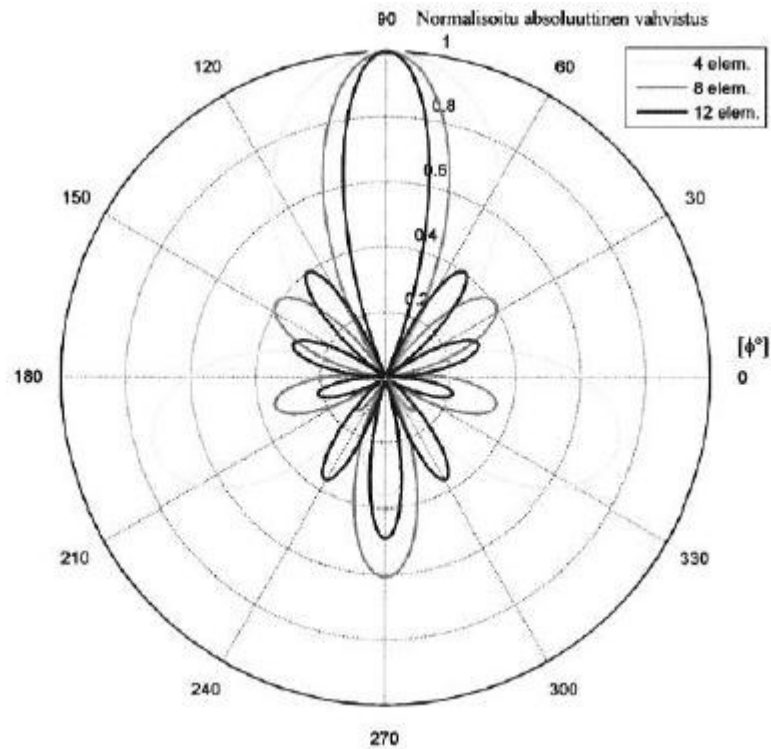
Tasavälinen lineaarinen antenniryhmä muodostetaan sijoittamalla valittu määrä antennielementtejä tietyn etäisyyden päähän toisistaan. Linearisessa antenniryhmässä antennielementit on asetettu suoralle. Antennielementtien määrää kuvataan termillä N . Tasoaallon saapuessa antenniryhmään kulmassa Φ x-akselin suuntaisesti, se saapuu antennielementeille eri ajanhetkellä. Antennin ryhmäkerroin kuvaa antennin säteilykuviota kaukokentässä [6] s.12. Kun yksittäisen antennielementin säteilykuvio kerrotaan antennin ryhmäkertoimella, saadaan antenniryhmän säteilykuvio horisontaalitasossa. [6] Antenniryhmän ryhmäkerroin horisontaalitasossa on muotoa: [34]

$$F(\phi) = \sum_{k=0}^{N-1} A_k e^{j(\kappa k d \cos \phi + k\alpha)},$$

Adaptiivisen antennin teoreettinen kokonaisvahvistus saadaan kertomalla yksittäisten antennielementtien vahvistus antennielementtien lukumäärällä. Mikäli tarkastellaan antenniryhmää, jonka yksittäisen elementin vahvistus on 1 ja antennielementtejä on 8 kappaletta, on antenniryhmän absoluuttinen vahvistus 9dBi. [6] s.11

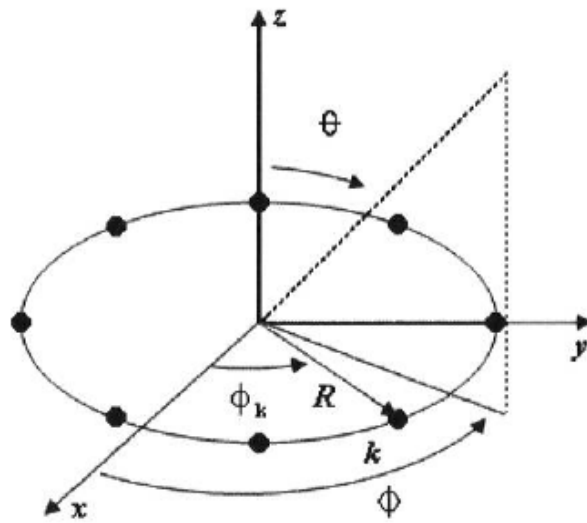
Antennielementit voidaan periaatteessa asettaa mihin konfiguraatioon tahansa. Yleisimmät käytännön sovellukset ovat kuitenkin lineaarisia tai ympyrämallisia antenniryhmiä. Ympyrämallisen adaptiivisen antenniryhmän etuna verrattuna lineaariseen ryhmään on 360° peittoalue verrattuna lineaarisen ryhmän 180° asteen peittoon. Kuvassa 10 esitetään kahdeksanelementtinen R-säteisen antenniryhmän periaatekuva. Kuvan antenniryhmän antennielementit on sijoitettu 45° asteen tasavälein. Antennielementtien tulisi olla vähintään $\lambda/2$ etäisyydellä toisistaan VHF/UHF-taajuusalueella. Tasavälisen ympyrämuotoisen antenniryhmän hinta ja fyysinen koko kasvavat antennielementtejä lisättäessä. [6]

Tasavälinen ympyräryhmä ja tasavälinen lineaarinen antenniryhmä tuottavat erilaisen säteilykuvion. Lineaarisen antenniryhmän pää- ja sivukeilat ovat kapeampia kuin ympyräryhmän pää- ja sivukeilat. Antennielementtien lukumäärä vaikuttaa säteilykuvioon siten, että elementtien lukumäärän lisääntyessä keilat kapenevat. Kuvassa 15 esitetään tasavälisen ympyräryhmän säteilykuvion muuttuminen horisontaalitasossa, kun antennielementtien lukumäärää kasvatetaan neljästä kahteentoista antennielementtiin. Antennielementit on sijoitettu $\lambda/2$ etäisyydelle toisistaan. [6] 10-18



Kuva 16: Tasavälisen ympyräryhmän normalisoitu absoluuttinen vahvistus horisontaalitasossa eri antennielementtien lukumäärällä [6] s.14

Matalilla taajuusalueilla antennin fyysisen koon tuottamaan suunnitteluhaasteeseen ei välttämättä löydy yksinkertaista ratkaisua, mutta esimerkiksi korkeammilla taajuusalueilla voidaan käyttää tulostettuja antennielementtejä, jotka voidaan suunnitella ja simuloida toimimaan halutulla taajuusalueella. Käytännössä ympyränmuotoisia antenniryhmiä voitaisiin käyttää Merivoimien aluksilla korvaamaan mekaanisesti suuntaavia log-periodisia suunta-antenneja NATO UHF I-taajuusalueella. Ympyränmuotoiset antenniryhmät voidaan korkeammilla taajuusalueilla suunnitella veneluokan aluksille fyysisen kokonsa puolesta, mutta niiden yksikköhinta voi nousta melko korkeaksi.



Kuva 16: Kahdeksanelementtinen R-säteinen antenniryhmä x,y,z -koordinaatistossa [6] s.13

Adaptiivisella antennilla on kyky luoda nollakohtia häirintälähettimien tai keskinäishäiriötä tuottavan antennin suuntaan. Nollakohtien lukumäärä on riippuvainen antennielementtien lukumäärästä. Mikäli antenniryhmässä on N -kappaletta elementtejä, antennilla on N -kappaletta vapausasteita, joita voidaan käyttää maksimien ja minimien luomiseen. Mikäli yksi vapausasteista käytetään signaalin suuntaamiseen haluttuun suuntaan, antenniryhmällä on edelleen $N-1$ vapausastetta maksimien ja minimien luomiseen [6] 10-18. Signaalien tulosuunnan arviointi vaatii adaptiiviselta antennilta suunnanmäärittäykseen tarkoitettuja algoritmeja, joiden toteutus vaihtelee esimerkiksi lähteen tunnisteen perusteella. [5] Antennien keilanmuodostuksessa voidaan käyttää esimerkiksi perinteistä keilanmuodostusta, jossa keilanmuodostusta ohjataan perinteisellä vaiheohjauksella. Muita keilanmuodostusmenetelmiä ovat esimerkiksi nollaohjausmenetelmä ja pienimmän keskivirheen menetelmä. Menetelmät vaativat joko tietoa hyöty- tai häiriösignaalin tulosuunnasta tai referenssisignaalin käyttöä. [6] 10-18

Vaiheohjattuja antennia on kehitetty erilaisiin sotilaallisiin sovelluksiin. Ensimmäiset vaiheohjatut järjestelmät olivat valvontatutkia. Vaiheohjattujen antennien kehitys ei ole rajoittunut tutkatekniikkaan, esimerkiksi GPS-vastaanottimia on kehitetty sotilaskäyttöön 1980-luvulta alkaen. Nykyaikaisten järjestelmien paikkatietoriippuvuus huomioon ottaen tämän kaltaisten laitteiden hankkiminen myös Puolustusvoimien ja Merivoimien järjestelmiin olisi vähintäänkin suotavaa. Adaptiivisten antennien ja ohjelmistoradioiden kehitys voisi mahdollistaa adaptiivisen antennijärjestelmän käytön ainakin suuremmilla taistelualuksilla jo tällä hetkellä. Adaptiivisten antennien käyttö voisi olla toteutettavissa kohtalaisen helposti, koska antenneihin liittyvä tutkimusta ja osaamista on Suomessa ja tutkimuksia on tehty suoraan Merivoimien tarpeisiin 1990-luvun lopussa. Kuvassa 8 esitetään adaptiivinen antenniryhmä testikäytössä Saaristomerellä [25].

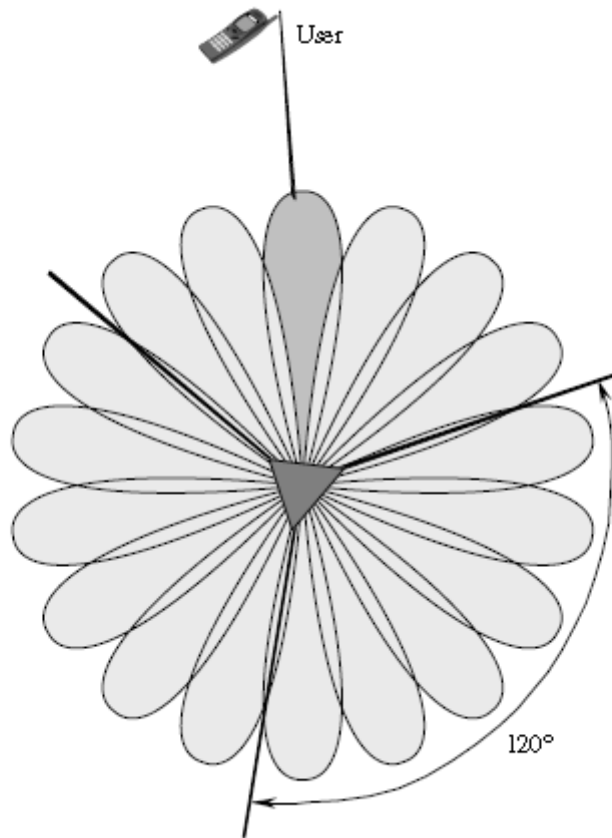


Kuva 17: Adaptiivinen kuusielementtinen antenniryhmä testikäytössä Saaristomerellä [25]

3.4. Kytkevän keilan antenni

Langattomien verkkojen suunnittelussa on yleensä luotava kompromissiratkaisu verkon peittoalueen ja kapasiteetin välillä. Ympärisäteilevä antennin lähettämä energia jakautuu tasaisesti ympyrän muotoiseen soluun. Antennielementtejä lisäämällä on mahdollista jakaa solu pienempiin sektoreihin käyttämällä useita antennielementtejä. Suuri osa ympärisäteilevän antennin tehosta ei koskaan saavuta vastaanottajaa ja säteily häiritsee edelleen muita samalla taajuusalueella toimivia antennia. Kytkevän keilan antennilla pyritään parantamaan antennin signaalikohinasuhdetta lisäämällä vahvistusta suhteessa vastaanottajan paikkaan [5]. Mobiililaitteiden tukiasemien toiminta perustuu osin kytkevän keilan antenneihin. Kytkevän keilan antenni voidaan rakentaa vaaka-, pysty- tai ympyräorientaatiolla tai näiden yhdistelmänä. [36]

Antennielementtien sijoittelu on riippuvainen antennin käyttötarkoituksesta. Kytkevän keilan antenni on tietokoneohjattu järjestelmä, jossa järjestelmän ohjausalgoritmi päättää mikä antennielementti lähettää ja vastaanottaa tilaajalle. Vastaanottaja voi olla sijoittuneena mihin tahansa pääkeilan suunnassa. Antennin keilakuvio on usein suunniteltu siten, että keilat ovat suhteessa toisiinsa hieman limittäin. Keilasta toiseen siirto on riippuvainen käytettävästä protokollasta ja se toteutetaan antennin ohjausalgoritmeilla. Kytkevän keilan antennin toimintaperiaate esitetään kuvassa 8, jossa on kuvattu kolmielementtinen antenniratkaisu. Mobiililaitteiden tukiasemat rakennetaan tyypillisesti kolmesta elementistä joiden sektorit ovat 120° [5]. Ympärisäteilevään antenniin verrattuna, kytkevän keilan antennilla saadaan kasvatettua suuntaavuutta ja vahvistusta sekä minimoitua lähte suuntiin, joissa sitä ei tarvita. [36] Esimerkiksi Pihlaja on insinöörityössään tutkinut kytkevän keilan antennin häiritsevyyttä [25].



Kuva 18: Kytettävän keilan antennin toimintaperiaate [5]

Kytettävän keilan antennin suunnitteluun keskeisesti vaikuttavia tekijöitä ovat antennielementtien lukumäärä ja elementtien välinen etäisyys. Antennielementtien lukumäärän kasvattaminen pienentää antennin pääkeilan leveyttä. Keilan leveyden pieneneminen vastaavasti kasvattaa kyseessä olevan keilan vahvistusta. Keilan vahvistuksen kasvaminen edelleen kasvattaa keilan tehotiheyttä ja siten maksimikapasiteettia ja kantamaa. Antennielementtien määrän lisääminen kasvattaa myös sivukeilojen määrää. Antennielementtien välinen etäisyys on yleensä käytännössä $\lambda/2$. [36]

Kytkevän keilan antennien käyttö on perusteltua, kun tavanomainen sektorointi ei ole kapasiteetin näkökulmasta riittävä radiojärjestelmälle. Kytkevän keilan antenneista voidaan saada merkittävää hyötyä kapasiteetin, suuntaavuuden ja vahvistuksen ja edelleen maksimikantaman näkökulmasta verrattuna ympärisäteileviin antenneihin. Kytkevän keilan antennin vertailua ympärisäteilevään ja log-periodiseen suunta-antenniin on toteutettu tämän tutkimuksen myöhemmissä luvuissa. Taulukossa 2 esitetään NATO UHF III+ taajuusalueella toimivan kytkevän keilan antennin teknisiä parametreja. Antennissa on 20 elementtiä ja sillä voidaan saavuttaa 15-19dBi vahvistus pääkeilan suuntaan. [8]

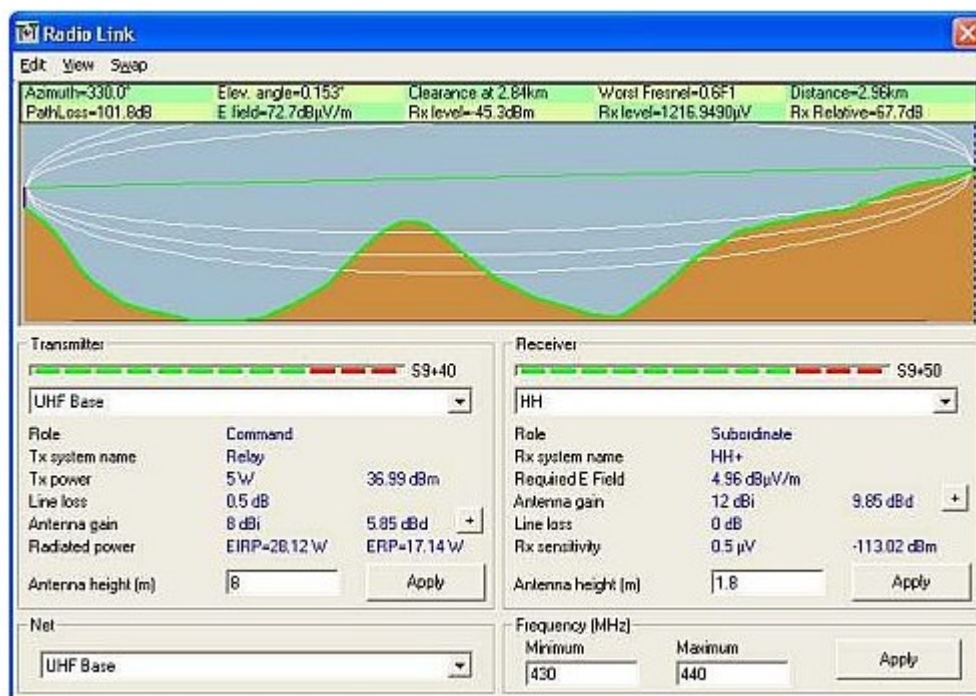
Taulukko 2: Cojot SBA1327B antennin teknisiä tietoja [8]

Taajuus	1350-2700 MHz
Polarisaatio	Vertikaalinen
Vahvistus	15-19 dBi
3dB keilanleveys	27-36°
Sivukeilataso	-16 dB
Teho	10W
Paino	15 kg

3.5. Skenaario 1 NATO UHF I

Skenaariossa 1 vertaillaan Merivoimien tyypillistä antennikalustoa NATO UHF I-taajuusalueella (225-400MHz). Skenaarion alueeksi on valittu Hangon alue. Skenaariossa on kolme toimijaa: Tukiasema, Rauma-luokan ohjusvene ja Jurmo-luokan maihinnousuvene. Skenaariossa tarkastellaan aluksille asennettavien eri antennivaihtoehtojen vaikutusta linkkibudjetin suuruuteen ja sitä kautta suurimpaan maksimaaliseen yhteysvälivaimennukseen. On huomioitava, että osa tutkijan käyttämistä parametreista on tutkijan omia arvioita. Merivoimille tyypillisten antennien vertailun jälkeen tarkastellaan adaptiivisen antennin todennäköistä vaikutusta linkkibudjetin suuruuteen samalla periaatteella, kuin tavanomaisten antennien tarkasteluissa. Skenaarion lopussa suoritetaan häirintätarkastelu kaikille valituille antennityypeille. Häirintä suoritetaan pinta-aluksesta pistetaajuisena häirintänä. Häirintään liittyvien parametrien arviointiin on käytetty lähteenä Kosolan ja Solanten teoksia [19][20].

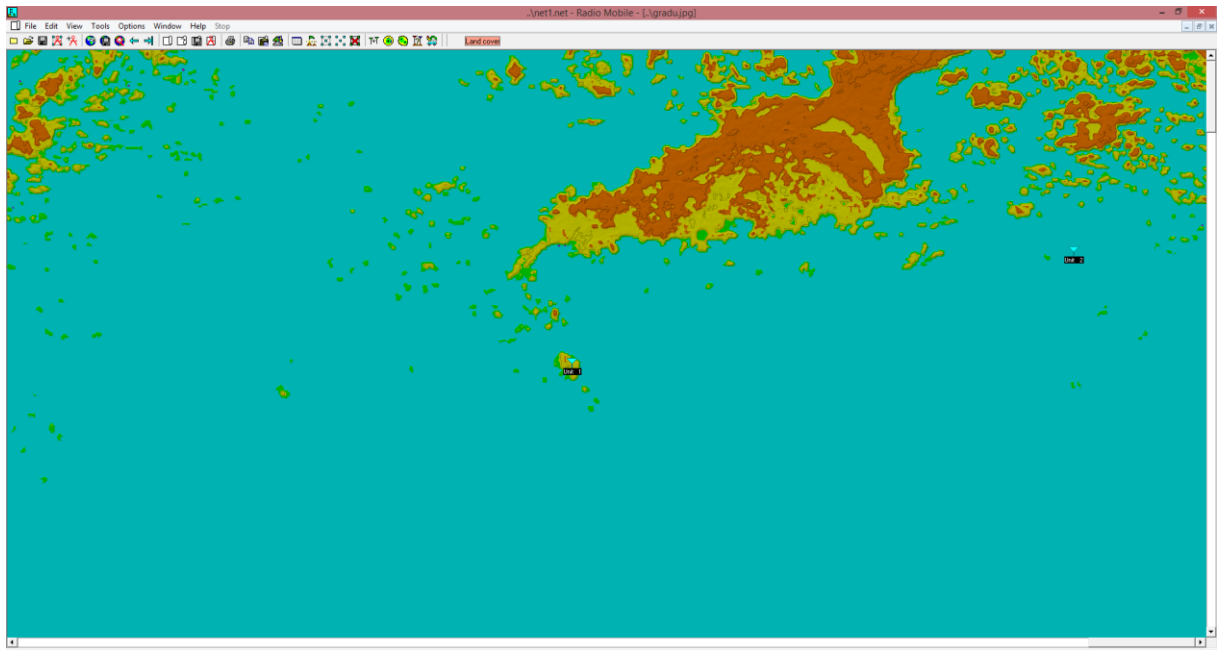
Skenaarion simulointiohjelmistona käytetään radioamatööritoimintaan suunnattua Radio Mobile verkkosuunnittelutyökalua. Radio Mobile simulointiohjelma käyttää kartta- ja korkeusaineistonaan esimerkiksi Google:n karttapalvelun aineistoa. Ohjelmaan on mahdollista tuoda omia kartta-aineistoja, luoda radioverkkoja ja simuloida liikkuvia tilaajia. On huomioitavaa, että Radio Mobile käyttää etenemisvaimennuksen laskemiseen ITM:n standardia. Radio Mobile:n avulla voidaan tukiaseman ja tilaajan välisen yhteyden lisäksi arvioida esteiden vaikutusta yhteyteen ja suunnitella tukiasemaverkon optimaalisia paikkoja. Ohjelman avulla on myös mahdollista analysoida yksittäisiä radiolinkkejä linkkianalyysityökalulla. Kuvassa 19 esitetään Radio Mobile:n työkalu Fresnell:n ensimmäisen vyöhykkeen esteiden tarkasteluun. Skenaariossa käytettävät Radio Mobile:n työkalut esitetään liitteessä 1.



Kuva 19: Radio Mobile:n linkkianalyysityökalu [27]

Skenaarion alueena toimii Hankoniemi. Tukiasema sijoitettiin Russarön saareen, koska saaresta on kohtalaisen esteetön näkyvyys avomerelle. Tukiasematoimisen radion oletetaan olevan teholtaan 50W ja antennin korkeuden 20 metriä. Antennien tyyppejä vaihdetaan ja vertaillaan skenaarion kuluessa. Alusten oletetaan olevan paikallaan, ja suunta-antennien olevan suunnattu tukiasemaan.

Skenaarion vasta-asemina toimivat Rauma-luokan ohjusvene ja Jurmo-luokan maihinnousuvene, jossa on asennettuna aiemmissa luvuissa esiteltyä antennikalustoa. Rauma-luokan antennikorkeus on 13 metriä ja Jurmo-luokan antenninkorkeus on 5 metriä. Kuvassa 20 esitetään skenaarion toiminta-alue Hankonimessä. Kuvassa tukiasema on sijoitettu Russarön saarelle ja Jurmo Hästö-Busön itäpuolelle. Korkeuskäyrät on asetettu värikoodauksella 10m välein.



Kuva 20: Radio Mobile:n käyttöliittymä [27]

Radio Mobile:n ohjelmistoon luodaan ensin haluttu alue ja viestiverkko. Verkon jäsenten parametreja voidaan muuttaa esimerkiksi yksikön paikan, antennin korkeuden, antennityypin ja lähetystehon osalta. Muokkaukset tallennetaan verkkotiedostoon ennen varsinaista simulointia. Tässä skenaariossa simulaatio on toteutettu ohjelman Polar coverage- työkalulla, jossa voidaan tarkastella toteutunutta yhteysväliä annetuilla parametreilla. Ennen simulointeja lasketaan linkkitasapaino, jolla määritetään minimiteho vastaanottimessa. Minimiteho vastaanottimessa määrittää vastaavasti maksimaalisen yhteysvälivaimennuksen. Tukiaseman ja yksikön välistä yhteyttä voidaan arvioida Polar Coverage- toiminnon lisäksi linkkianalyysityökalulla. Linkkianalyysityökalua on tässä tutkimuksessa käytetty varmentamaan yhteysvälivaimennuksen toteutuminen suurusluokaltaan oikealla etäisyydellä tukiasemasta.

Tukiaseman ja radiokaluston ominaisuudet vaikuttavat olennaisesti yhteysvälin pituuteen ja linkin toimivuuteen. Skenaariossa käytettävien laitteiden ja antennien tekniset tiedot on koottu taulukoiksi, jotka esitetään ennen simulaatioita. Laitteiden tekniset tiedot perustuvat osin tutkijan omaan arvioon ja osin laitteiden teknisiin tietoihin. Vastaanottimen herkkyuden arvioinnissa ja laitteiden kaapeloinnissa aiheutuvat häviöt perustuvat tutkijan omaan arvioon. Taulukossa 3 esitetään skenaarion parametreja.

Taulukko 3: Laitteiden ja antennien teknisiä parametreja

	Tukiasema Russarö	Rauma-luokka	Jurmo
Antennin korkeus	20m	13m	5m
Lähetysteho	50W (47dBm)	25W (44dBm)	10W (40dBm)
Taajuus	400MHz	400MHz	400MHz
Antennityyppi	Dipoli	Dipoli	Dipoli
Antennin vahvistus	2 dBi (-0,15dBd)	2 dBi (-0,15dBd)	2 dBi (-0,15dBd)
Rx herkkyys	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)
Laitteiden häviöt	6dB	6dB	6dB

Radioyhteyden muodostuminen vaatii asemilta kykyä vastaanottaa toisiltaan riittävästi tehoa. Linkin tasapainon arviointi on tärkeää, koska tukiaseman ja tilaajan tehotasot voivat erota toisistaan merkittävästi. Taulukossa 4 ja 5 esitetään linkkitasapainon arviointi valituille antenneille. Linkkitasapainossa on määritetty kaikille antennille maksimaalinen sallittu yhteysvälivaimennus, jonka kautta tarkastellaan välin toimivuutta karttaan sitoen. Maksimaalisen yhteysvälivaimennuksen toteutuminen todennettiin linkkianalyysityökalun avulla siirtämällä analysoitava yksikkö etäisyydelle, jossa maksimaalinen vaimennus toteutuu.

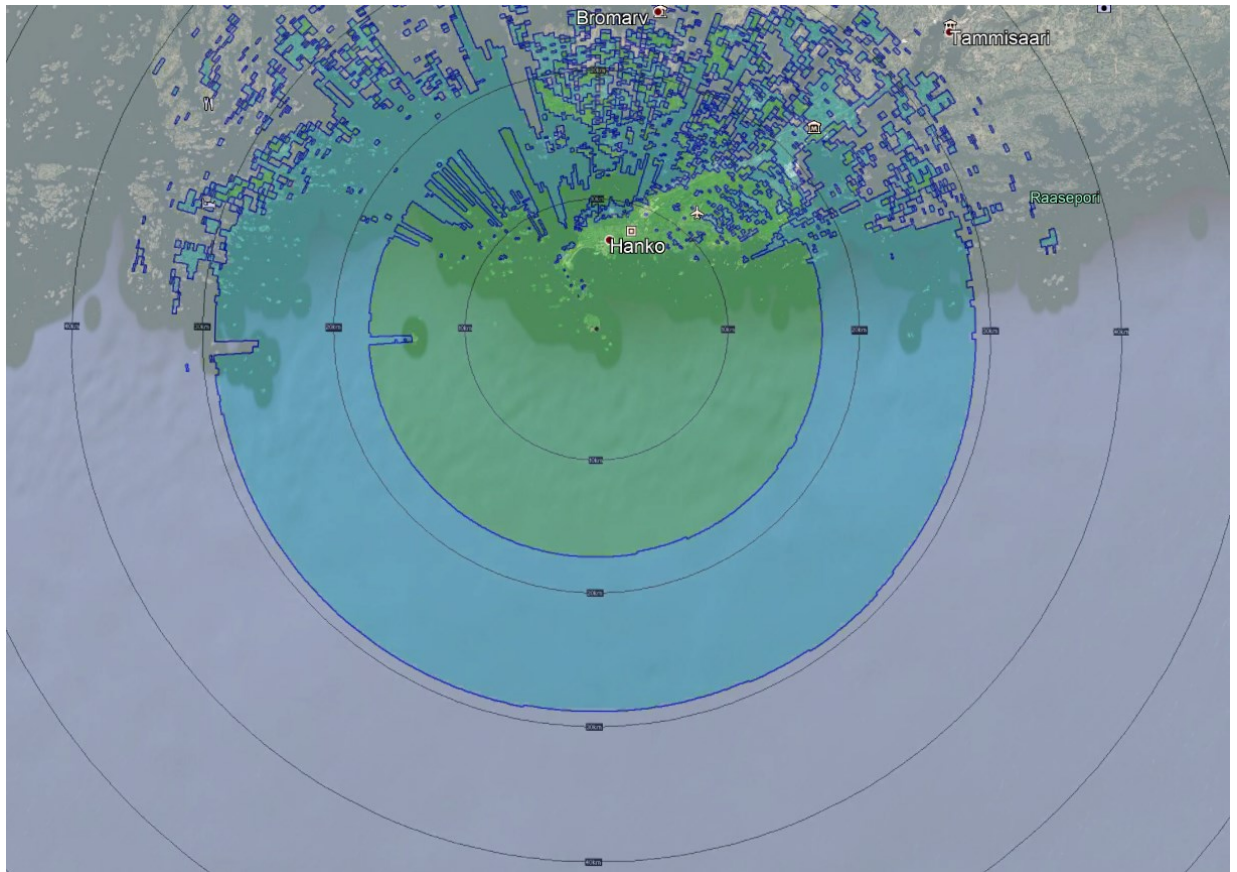
Taulukko 4: Linkkitasapaino Tukiasema – Rauma

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	44	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	2	dB	c
ERP	43	dBm	d= a+b+c	ERP	40	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	2	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	146	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	143	dB	i = d-h

Taulukko 5: Linkkitasapaino Tukiasema - Jurmo

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	40	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	2	dB	c
ERP	43	dBd	d= a+b+c	ERP	36	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	2	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	146	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	139	dB	i = d-h

Edellisen taulukon perusteella voimme havaita, että maksimaalinen yhteysettäisyys käytettäessä tutkittavia antennia vaihtelee. Vaihtelu aiheutuu vain antennien erilaisista lähetystehoista, koska antennien vahvistukset ja häviöt ovat yhtä suuret. Maksimaalinen sallittu yhteysvälivaimennus asetetaan seuraavaksi simulaatio-ohjelman parametriksi, jolloin nähdään suurin etäisyys, jolla maksimaalinen sallittu yhteysvälivaimennus edelleen toteutuu. Kuvassa 21 esitetään tarkasteltujen antennien kyky saavuttaa Russarön tukiasema karttaan sitoen. Jurmo-luokan maksimaalinen kaksisuuntainen yhteysväli on noin 17 kilometriä ja Rauma-luokan noin 29 kilometriä. Kuvassa Jurmo-luokan kaksisuuntainen yhteysväli on kuvattu vihreällä värillä ja Rauma-luokan kaksisuuntainen yhteysväli sinisellä värillä.



Kuva 21: Rauma- ja Jurmo-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema valituilla parametreillä

Seuraavaksi tutkitaan suunta-antennin vaikutusta yhteysvälin pituuteen asettamalla liikkuville tilaajille log-periodiset suunta-antennit. Russarön tukiaseman antenni on edelleen ympärisäteilevä. Mikäli tukiasemalle asennettaisiin yksi mekaaninen suunta-antenni, se voisi palvella vain yhtä tilaajaa kerrallaan. Suunta-antennien vahvistus on tyypillisesti suurempi kuin dipoliantennien vahvistus. Todellisuudessa log-periodisten antennien vahvistus muuttuu toimintataajuutta muutettaessa, mutta tässä skenaariossa oletetaan, että vahvistus pysyy vakiona. Simulaation parametrit esitetään taulukossa 6.

Taulukko 6: Laitteiden ja antennien teknisiä parametreja

	Tukiasema Russarö	Rauma-luokka	Jurmo
Antennin korkeus	20m	13m	5m
Lähetysteho	50W (47dBm)	25W (44dBm)	10W (40dBm)
Taajuus	400MHz	400MHz	400MHz
Antennityyppi	Dipoli	Log-periodinen	Log-periodinen
Antennin vahvistus	2 dBi (-0,15dBd)	6 dBi (3,85 dBd)	6 dBi (3,85 dBd)
Rx herkkyys	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)
Laitteiden häviöt	6dB	6dB	6dB

Tukiaseman ja tilaajien välinen maksimaalinen yhteysvälivaimennus lasketaan kuten edellisessä simulaatiossa. Taulukoissa 7 ja 8 esitetään linkkitasapaino tukiaseman ja yksiköiden osalta. Taulukoista voi havainnoida, että suunta-antennien käyttö kasvattaa maksimaalista yhteysvälivaimennusta ja siten maksimikantamaa.

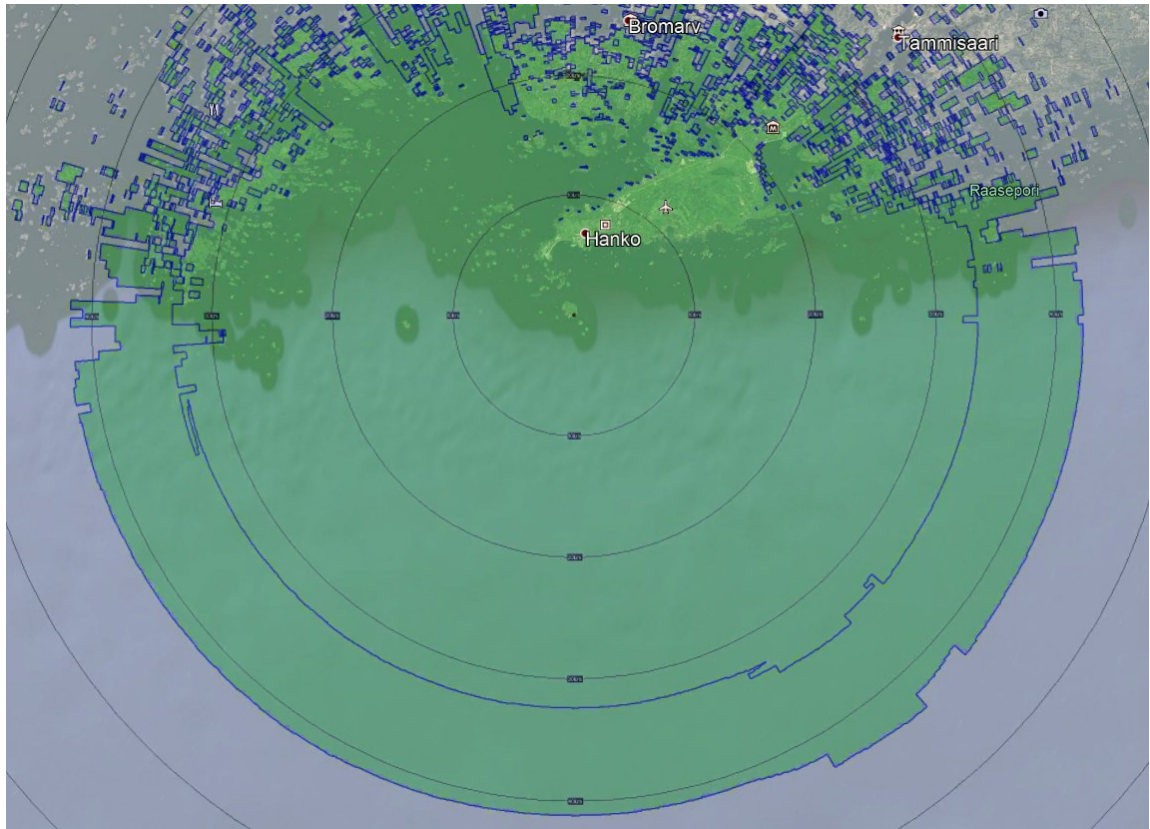
Taulukko 7: Linkkitasapaino Tukiasema – Rauma

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	44	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dBi	c	Antennivahvistus	6	dBi	c
ERP	43	dBm	d= a+b+c	ERP	44	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	6	dBi	f	Antennivahvistus	2	dBi	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-107	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteysvälivaimennus (maksimi)	150	dB	i = d-h	Yhteysvälivaimennus (maksimi)	147	dB	i = d-h

Taulukko 8: Linkkitasapaino Tukiasema – Jurmo

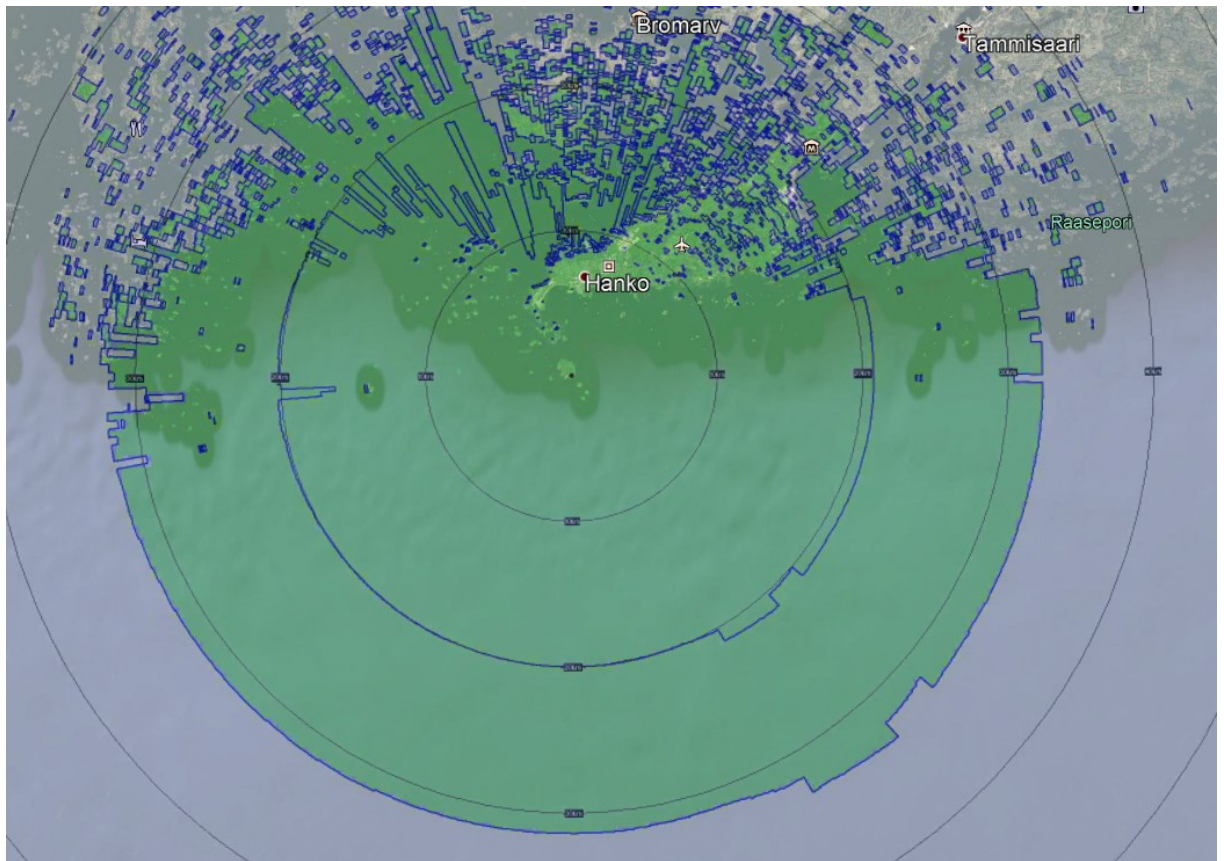
Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	40	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	6	dB	c
ERP	43	dBm	d= a+b+c	ERP	40	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	6	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanotimessa	-107	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanotimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteysvälivaimennus (maksimi)	150	dB	i = d-h	Yhteysvälivaimennus (maksimi)	143	dB	i = d-h

Linkkitasapainoa tarkastellessa havaitsemme, maksimaalinen yhteysvälivaimennus on kasvanut suunta-antennien dipoliantenneja korkeamman vahvistuksen ansiosta. Linkki on kuitenkin hieman epätasapainossa, koska tilaajien maksimaalinen yhteysvälivaimennus tukiaseman suuntaan on pienempi. Kaksisuuntainen yhteys tukiaseman ja tilaajan välillä asetetuilla arvoilla toteutuu vain, kun pienempi yhteysvälivaimennus on voimassa. Kuvassa 22 esitetään Rauma-luokan ja tukiaseman välinen yhteysväli. Ulommalla kaarella toteutuu vain yksisuuntainen yhteys tukiasemasta Rauma-luokkaan. Sisempi kaari kuvaa kaksisuuntaisen yhteyden maksimia.



Kuva 22: Rauma-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä mekaanista suunta-antennia

Tukiaseman ja Jurmo-luokan välinen yhteys on vastaavasti epätasapainossa. Kuvassa 23 ulompi kaari kuvaa tukiaseman kykyä saavuttaa yksisuuntainen yhteys Jurmo-luokkaan. Verattuna dipoliantenniin Jurmo-luokan kyky saavuttaa kaksisuuntainen yhteys tukiasemaan on parantunut käyttäessä suunta-antennia, mutta sen alhainen lähetysteho rajoittaa yhteysvälin pituuden noin 20 kilometriin avomerelle.



Kuva 23: Jurmo-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä mekaanista suunta-antennia

Rauma- ja Jurmo-luokkien kyky saavuttaa Russarön tukiasema rajoittaa yhteysvälin kaksisuuntaisen toiminnan Jurmo-luokalla noin 20 kilometriin ja Rauma-luokalla noin 32 kilometriin. kaksisuuntainen yhteysväli on kasvanut antennien kasvaneiden vahvistusten vuoksi. Kaksisuuntaista yhteysväliä rajoittavista tekijöistä suurin on Rauma- ja Jurmo-luokkien matalampi lähetysteho tukiasemaan verrattuna.

Seuraavaksi arvioidaan vaikutus linkkibudjettiin käyttäessä adaptiivista antennia. Adaptiivisen antennin vahvistus on riippuvainen antenniryhmän suunnittelusta ja käytettävistä elementeistä. Tässä tutkimuksessa on arvioitu, että adaptiivisella antennilla voidaan saavuttaa 10 dBi vahvistus isotrooppiseen antenniin verrattuna. Tukiaseman antenni on dipoliantenni. Muut simulaatiossa käytettävät parametrit esitetään taulukossa 9.

Taulukko 9: Laitteiden ja antennien teknisiä parametreja

	Tukiasema Russarö	Rauma-luokka	Jurmo
Antennin korkeus	20m	13m	5m
Lähetysteho	50W (47dBm)	25W (44dBm)	10W (40dBm)
Taajuus	400MHz	400MHz	400MHz
Antennityyppi	Dipoli	Adaptiivinen	Adaptiivinen
Antennin vahvistus	2 dBi (-0,15dBd)	10 dBi (dBd)	10 dBi (dBd)
Rx herkkyys	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)
Laitteiden häviöt	6dB	6dB	6dB

Tukiaseman ja yksiköiden kyky saavuttaa asetettujen parametrien mukainen yhteysväli on laskettu vastaavasti, kuin aiemmissa taulukoissa. Kuten mekaanisen suunta-antennin tapauksessa, havaitsemme maksimaalisen yhteysvälivaimennuksen kasvavan taulukoissa 10 ja 11.

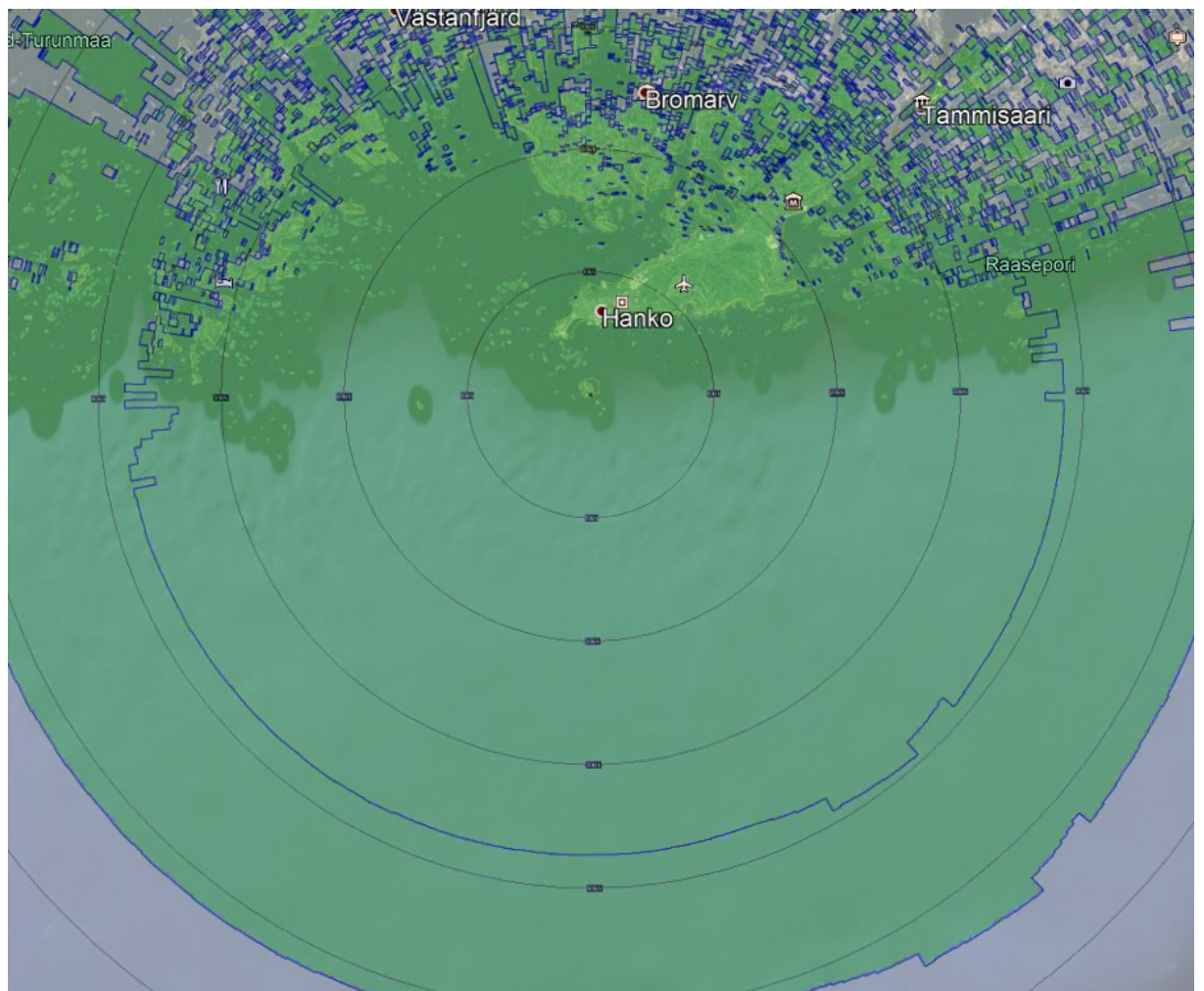
Taulukko 10: Linkkitasapaino Tukiasema – Rauma

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	44	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dBi	c	Antennivahvistus	10	dBi	c
ERP	43	dBm	d= a+b+c	ERP	48	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	10	dBi	f	Antennivahvistus	2	dBi	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-111	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteysvälivaimennus (maksimi)	154	dB	i = d-h	Yhteysvälivaimennus (maksimi)	151	dB	i = d-h

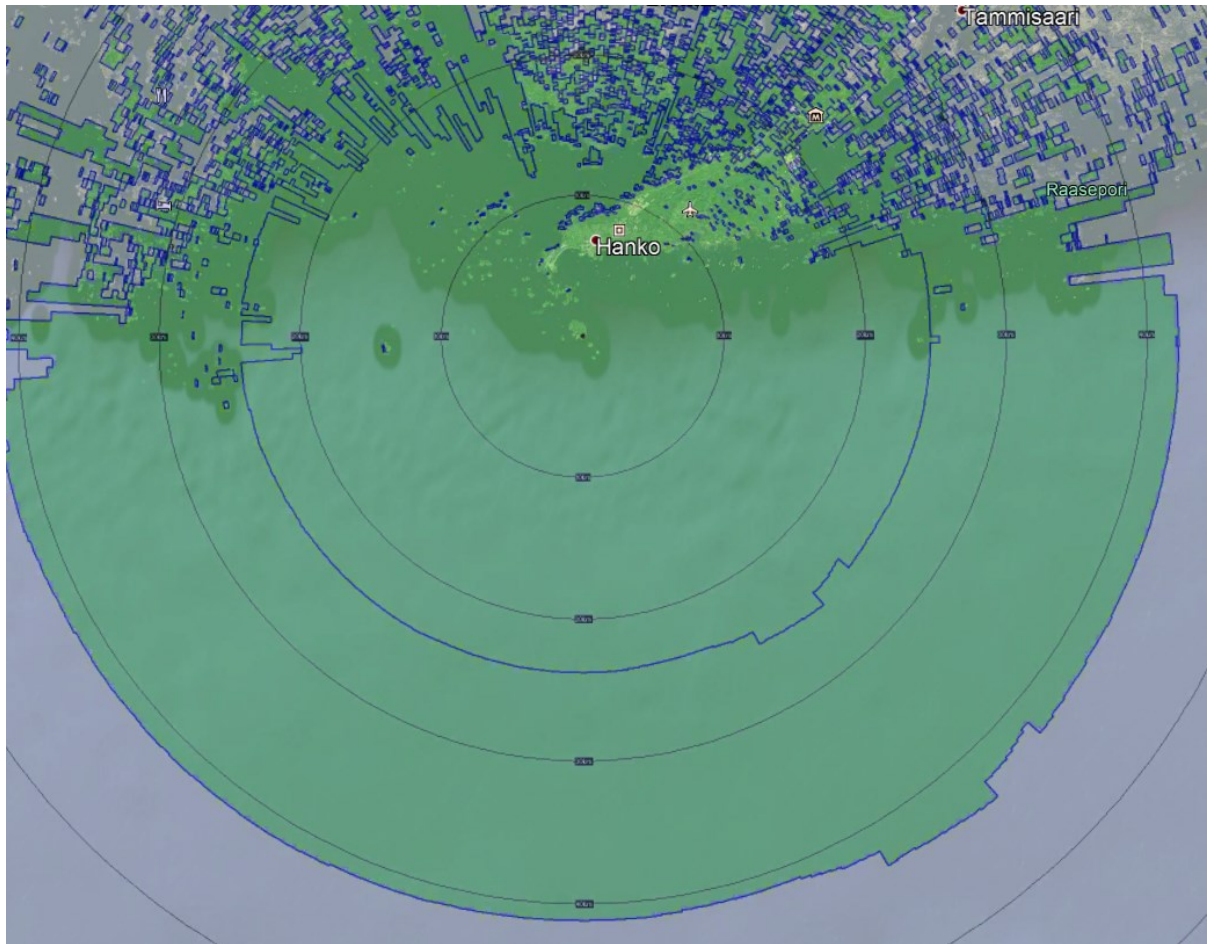
Taulukko 11: Linkkitasapaino Tukiasema – Jurmo

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	47	dBm	a	Lähetysteho	40	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	10	dB	c
ERP	43	dBm	d = a+b+c	ERP	44	dBm	d = a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	10	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-111	dBm	h = e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h = e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	154	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	147	dB	i = d-h

Linkkitasapainon tarkastelusta havaitsemme, että yhteyden muodostumista rajoittaa liikkuvien tilaajien lähetysteho. Adaptiivisen antennin muita tarkasteltuja antennityyppejä suurempi vahvistus kuitenkin kasvattaa maksimaalista kaksisuuntaista yhteysvälin pituutta. Kuvissa 24 ja 25 esitetään Rauma- ja Jurmo-luokkien kyky yksi- ja kaksisuuntaiseen liikennöintiin käytettäessä valittuja parametreja. Rauma-luokan tapauksessa maksimaalinen kaksisuuntainen yhteysväli ulottuu noin 37 kilometrin etäisyydelle, joka on radiohorisontin etäisyys tukiaseman ja Rauma-luokan välillä. Jurmo-luokan tapauksessa maksimaalinen kaksisuuntainen yhteysväli on noin 25 kilometriä.



Kuva 24: Rauma-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä adaptiivista antennia



Kuva 25: Jurmo-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä adaptiivista antennia

Skenaarion 1 tuloksista voimme todeta, että suunta-antenneilla voidaan kasvattaa tukiaseman ja aluskaluston välistä maksimaalista kaksisuuntaista yhteysväliä UHF I-taajuuksalueella. Suunta-antennien ympärisäteileviä antennia suurempi vahvistus kasvattaa suurinta mahdollista yhteysvälivaimennusta muodostettavalle yhteysvälille. Suunta-antennien käyttö ei toisaalta ole aivan ongelmaton, ne ovat yleensä fyysiseltä kooltaan suurempia ja hinnaltaan kalliimpia kuin ympärisäteilevät antennit. Skenaariossa 1 havaittiin myös, että käytettäessä suuritehoista ympärisäteilevää tukiasema-antennia yhteyden rajoittavimmaksi tekijäksi muodostui aluskaluston pieni lähetysteho ja matala antenninkorkeus.

3.6. Skenaario 2 NATO UHF III+

Skenaariossa 2 tarkasteltavaa taajuutta muutetaan. Tarkasteltava taajuus valitaan NATO UHF III+ alueelta. Taajuuden kasvaessa radioaalto etenee enenevissä määrin näköyhteysreittiä pitkin ja esteiden vaikutus linkinmuodostukseen korostuu. Skenaariossa 2 tukiasema on vastaavalla paikalla, kuin skenaariossa 1. Merivoimien aluskalustosta tarkastellaan edelleen Rauma-luokan ohjusvenettä ja Jurmo-luokan maihinnousuvenettä. Antennien korkeudet ja laitteiden parametrit mukailevat skenaariota 1. Skenaariossa 2 tarkasteltavat antennit ovat ympärisäteilevä antenni ja kytkettävän keilan antenni. Taulukossa 12 esitetään skenaariossa tutkittavan tukiaseman ja alusten viestikaluston teknisiä parametreja. Skenaariossa 2 tukiaseman antennin korkeus on nostettu 30 metriin merenpinnan tasosta esteettömän näkyvyyden varmistamiseksi.

Taulukko 12: Laitteiden ja antennien teknisiä parametreja

	Tukiasema Russarö	Rauma-luokka	Jurmo
Antennin korkeus	30m	13m	5m
Lähetysteho	5W (37dBm)	5W (37dBm)	5W (37dBm)
Taajuus	2700MHz	2700MHz	2700MHz
Antennityyppi	Dipoli	Dipoli	Dipoli
Antennin vahvistus	2 dBi (-0,15dBd)	2 dBi (-0,15dBd)	2 dBi (-0,15dBd)
Rx herkkyys	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)	1µV (-107dBm)
Laitteiden häviöt	6dB	6dB	6dB

Tukiaseman ja yksiköiden kyky saavuttaa asetettujen parametrien mukainen yhteysväli on laskettu vastaavasti, kuin aiemmissa taulukoissa. Taulukoissa 13 ja 14 esitetään linkkitasapaino yhteysvälille käytettäessä taulukon 112 parametreja.

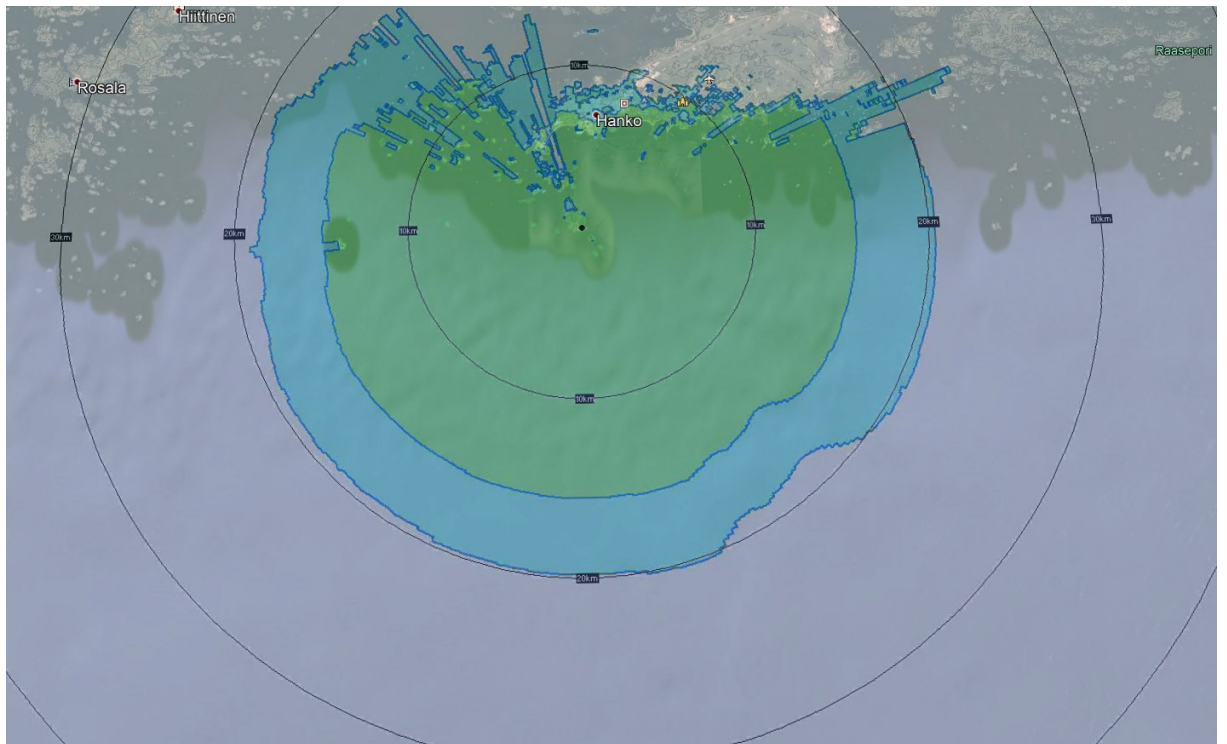
Taulukko 13: Linkkitasapaino Tukiasema – Rauma

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	37	dBm	a	Lähetysteho	37	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	2	dB	c
ERP	33	dBm	d= a+b+c	ERP	33	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	2	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	136	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	136	dB	i = d-h

Taulukko 14: Linkkitasapaino Tukiasema – Jurmo

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	37	dBm	a	Lähetysteho	37	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	2	dB	c	Antennivahvistus	2	dB	c
ERP	33	dBd	d= a+b+c	ERP	33	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	2	dB	f	Antennivahvistus	2	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-103	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	136	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	136	dB	i = d-h

Linkkitasapainon tarkastelusta havaitsemme, että käytettäessä samaa lähetystehoa ja vahvistusta kaikissa antennissa linkkibudjetit ovat tasapainossa. Maksimaalinen kaksisuunteinen yhteysväli on siis sama tukiasemalta tilaajalle ja toisin päin. Kuvassa 26 esitetään kaksisuunteisen yhteysvälin maksimikantamat Rauma- ja Jurmo-luokille käytettäessä dipoliantenneja 2,7 GHz taajuudella. Russarön tukiaseman edustalla olevat saaret aiheuttavat signaalille lisävaimennusta. Avomerelle kantamat ovat Rauma-luokan tapauksessa noin 20 kilometriä ja Jurmo-luokan tapauksessa noin 15 kilometriä.



Kuva 26: Rauma- ja Jurmo-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä dipoliantenneja 2700MHz taajuudella

Seuraavaksi tarkastellaan tilannetta, jossa aluksiin ja tukiasemaan asennetaan kytkettävän keilan antennit. Tarkastelussa oletetaan, että antennit ovat suunnattu tarkasti toisiinsa. Taulukossa 15 esitetään tarkasteltavien laitteiden ja antennien parametrit.

Taulukko 15: Laitteiden ja antennien teknisiä parametreja

	Tukiasema Russarö	Rauma-luokka	Jurmo
Antennin korkeus	30m	13m	5m
Lähetysteho	5W (37dBm)	5W (37dBm)	5W (37dBm)
Taajuus	2700MHz	2700MHz	2700MHz
Antennityyppi	Kytketyn keilan antenni	Kytketyn keilan antenni	Kytketyn keilan antenni
Antennin vahvistus	13 dBi (dBd)	13 dBi (dBd)	13 dBi (dBd)
Rx herkkyys	1μV (-107dBm)	1μV (-107dBm)	1μV (-107dBm)
Laitteiden häviöt	6dB	6dB	6dB

Linkkitasapainon tarkastelusta havaitsemme, että linkit ovat tasapainossa ja yhteysvälivaimennuksen maksimi on kasvanut huomattavasti verrattuna dipoliantennitarkasteluun. Voimakkaasti suuntaavan antennin voidaan tässä tapauksessa olettaa kasvattavan yhteysvälin pituutta huomattavasti. Taulukoissa 16 ja 17 esitetään kytkettävän keilan antennien linkkitasapainon tarkastelu.

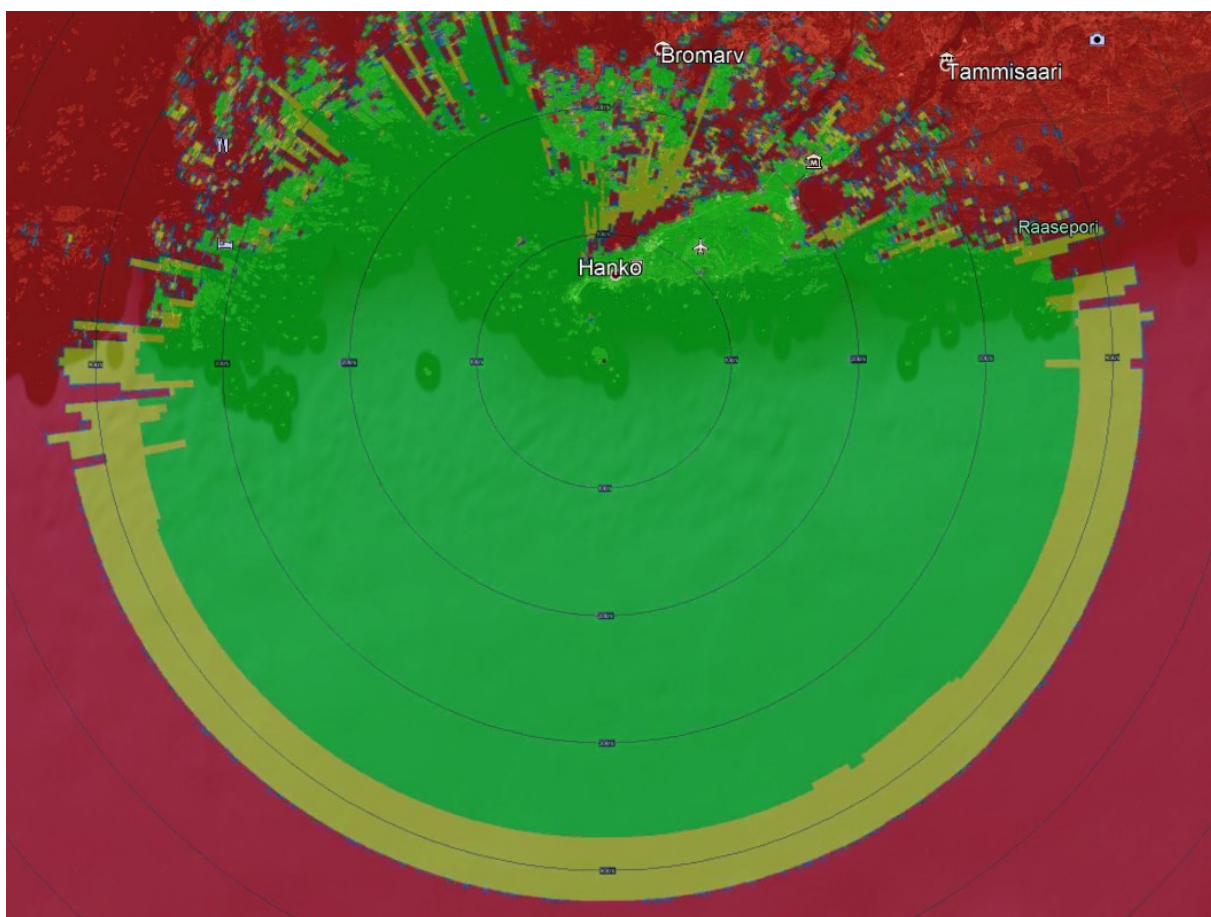
Taulukko 16: Linkkitasapaino Tukiasema – Rauma

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	37	dBm	a	Lähetysteho	37	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	13	dBi	c	Antennivahvistus	13	dBi	c
ERP	44	dBm	d= a+b+c	ERP	44	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	13	dBi	f	Antennivahvistus	13	dBi	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-114	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-114	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	158	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	158	dB	i = d-h

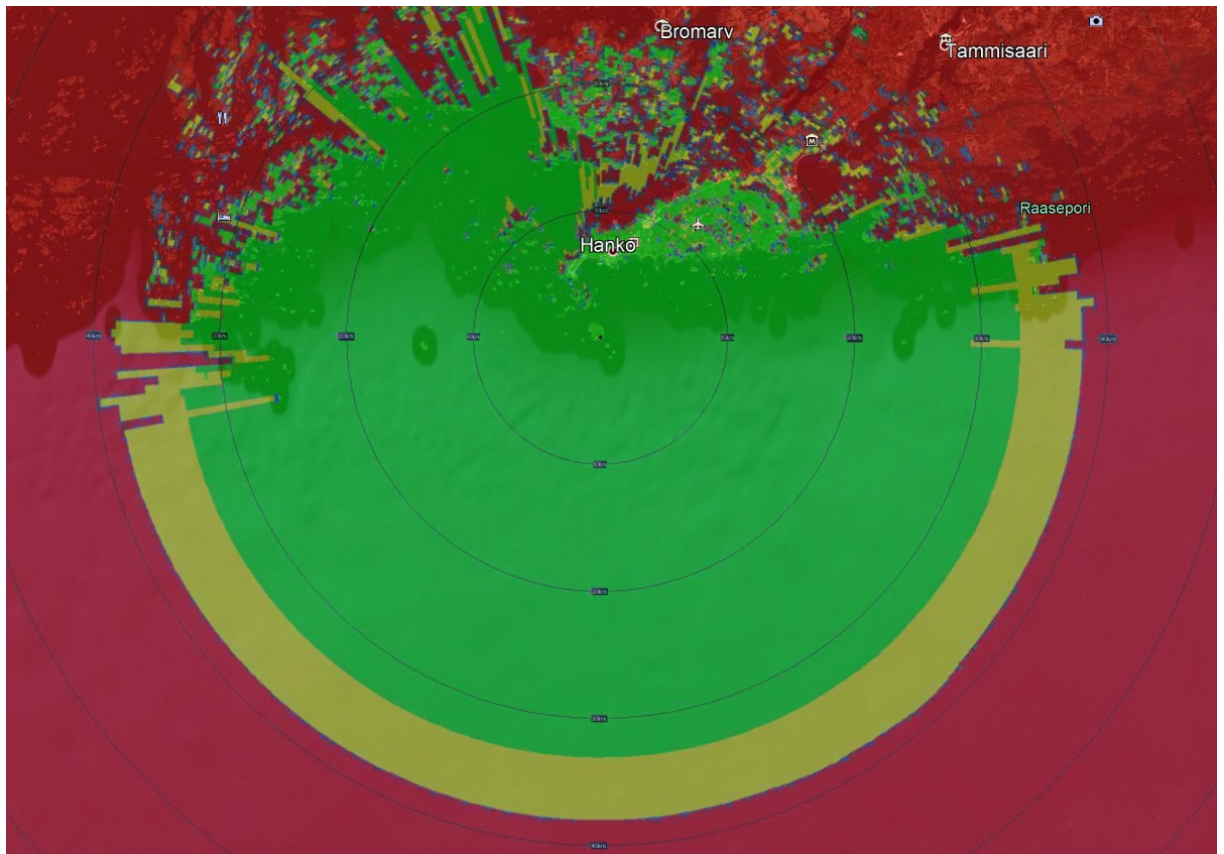
Taulukko 17: Linkkitasapaino Tukiasema – Jurmo

Downlink		Yksikkö	Kaava	Uplink		Yksikkö	Kaava
Lähetysteho	37	dBm	a	Lähetysteho	37	dBm	a
Lähettimen häviöt	-6	dB	b	Lähettimen häviöt	-6	dB	b
Antennivahvistus	13	dB	c	Antennivahvistus	13	dB	c
ERP	44	dBd	d= a+b+c	ERP	44	dBm	d= a+b+c
Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e	Vastaanottimen herkkyys	-107	dBm	e
Antennivahvistus	13	dB	f	Antennivahvistus	13	dB	f
Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g	Vastaanottimen häviöt	-6	dB	g
Minimiteho vastaanottimessa	-114	dBm	h= e-f-g	Minimiteho vastaanottimessa	-114	dBm	h= e-f-g
Yhteyvälivaimennus (maksimi)	158	dB	i = d-h	Yhteyvälivaimennus (maksimi)	158	dB	i = d-h

Yhteyvälivaimennuksen maksimiarvojen erotus verrattaessa kytkettävän keilan antenneja dipoliantenneihin on 18dB eli 63 kertaa suurempi. Käytännössä Rauma-luokan tapauksessa, kun käytössä on kytkettävän keilan antenni sekä tukiasemassa että aluksessa voidaan saavuttaa radiohorisontin etäisyys. Radiohorisontti on tässä tarkastelussa noin 37,5 kilometrin etäisyydellä. Jurmo-luokan tapauksessa radiohorisontti on noin 31,8 kilometrin etäisyydellä ja se on mahdollista saavuttaa tutkitun kaltaisella antenniratkaisulla. On kuitenkin huomioitavaa, että tässä tarkastelussa antennit on suunnattu tarkasti toisiinsa eikä suuntausvirhettä ole huomioitu. Kuvissa 27 ja 28 esitetään Rauma- ja Jurmo-luokkien kyky saavuttaa kaksisuuntainen yhteys Rusarön tukiasemaan käytettäessä kytkettävän keilan antenneja sekä aluksessa, että tukiasemassa. Vihreällä värillä oleva alue kuvaa sitä aluetta, jossa linkkibudjetin maksimimaalisen etenemisvaimennuksen ehto täyttyy. Keltaisella värillä kuvatulla alueella signaali on heikentynyt 3dB verrattuna maksimaaliseen etenemisvaimennukseen. Punaisella alueella signaali on heikentynyt yli 3dB maksimaalisesta etenemisvaimennuksesta.



Kuva 27: Rauma-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä voimakkaasti suuntaavaa antennia 2700MHz taajuudella



Kuva 28: Jurmo-luokan kyky saavuttaa Russarön tukiasema käyttäessä voimakkaasti suuntaavaa antennia 2700MHz taajuudella

Skenaarion yhteenvedona voidaan todeta, että pieni lähetysteho ei välttämättä tarkoita lyhyttä yhteysvälin pituutta mikäli antenneissa on suhteellisesti suuri vahvistus. Suuntaavan antennin käyttö on tehokkainta, kun se on asennettu sekä tukiasemaan, että alukseen. Suhteellisesti suuren vahvistuksen omaavien antennien käytöllä on mahdollista saavuttaa radiohorisonttiin yltäviä yhteyksiä jopa 5 watin lähetystehoa käyttämällä.

3.7. Häirintätarkastelu

Häirintä ja häiriötarkastelussa keskitytään vertaamaan ympärisäteilevää antennia suunta-anteneihin. NATO UHF I-alueella verrataan ympärisäteilevää antennia mekaaniseen suunta-anteniin. NATO UHF III+-alueella verrataan ympärisäteilevää antennia kytkettävän keilan anteniin. Häirintäskenaario on staattinen ja yksiköt eivät ole liikkeessä. Skenaariossa oletetaan, että häiritsijä on kyennyt havaitsemaan tukiaseman. Häirintä tapahtuu kohinahäirintänä ilmasta 200km, 100km ja 50 km etäisyyksiltä. Häirintälähtetimen tehon oletetaan olevan 100 W. Häirintäkoneen oletetaan lentävän 4500 metrin korkeudella merenpinnan tasosta. Häirinnän etenemisvaimennuksen arvioimiseen on käytetty vapaan tilan vaimennuksen kaavaa, koska antenit ovat toistensa näkyvissä. Häirintälähtetimestä oletetaan olevan laajakaistainen antenni, jonka vahvistus on 3dBi. Häirintätarkastelun tuloksesta voidaan arvioida häirinnän vaikutusta maksimaaliseen yhteysetäisyyteen tukiaseman ja alusten välillä.

Tässä tarkastelussa tukiaseman ja alusten yhteyden arvoina käytetään jo aiemmissa taulukoissa esitettyjä arvoja, jolloin kaksisuuntainen yhteys toteutuu. Seuraavaksi lasketaan häirinnän vaikutus tukiaseman vastaanottimeen eri tilanteissa.

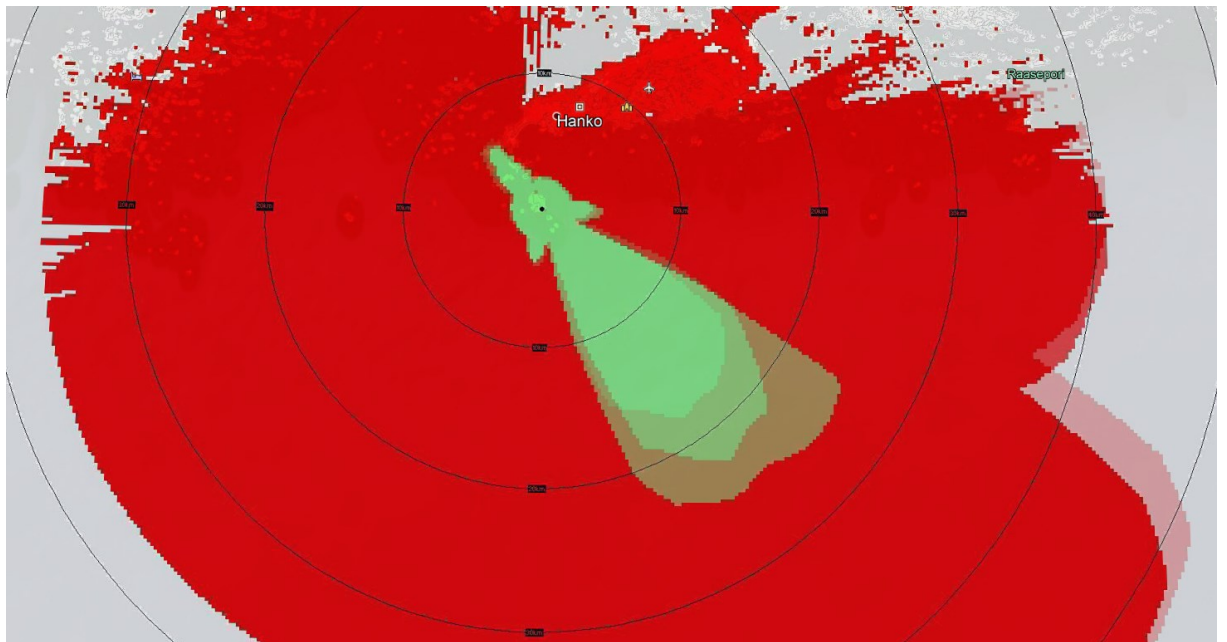
Häirintäteho vastaanottimessa pääkeilan suunnassa saadaan lisäämällä häirintätehoon antennien vahvistukset ja vähentämällä etenemisvaimennus [19]. Vapaan tilan vaimennus on taajuusriippuvaista ja se on huomioitu laskelmassa molemmille taajuuksille. Häirinnän tehovertailun tulokset esitetään taulukossa 18. Tuloksista voidaan päätellä, että häirintäteho vastaanottimessa on huomattavasti suurempi kuin yhteyden muodostamiseen vaadittava hyötyteho.

Taulukko 18: Häirintätarkastelun tehovertailun tulokset

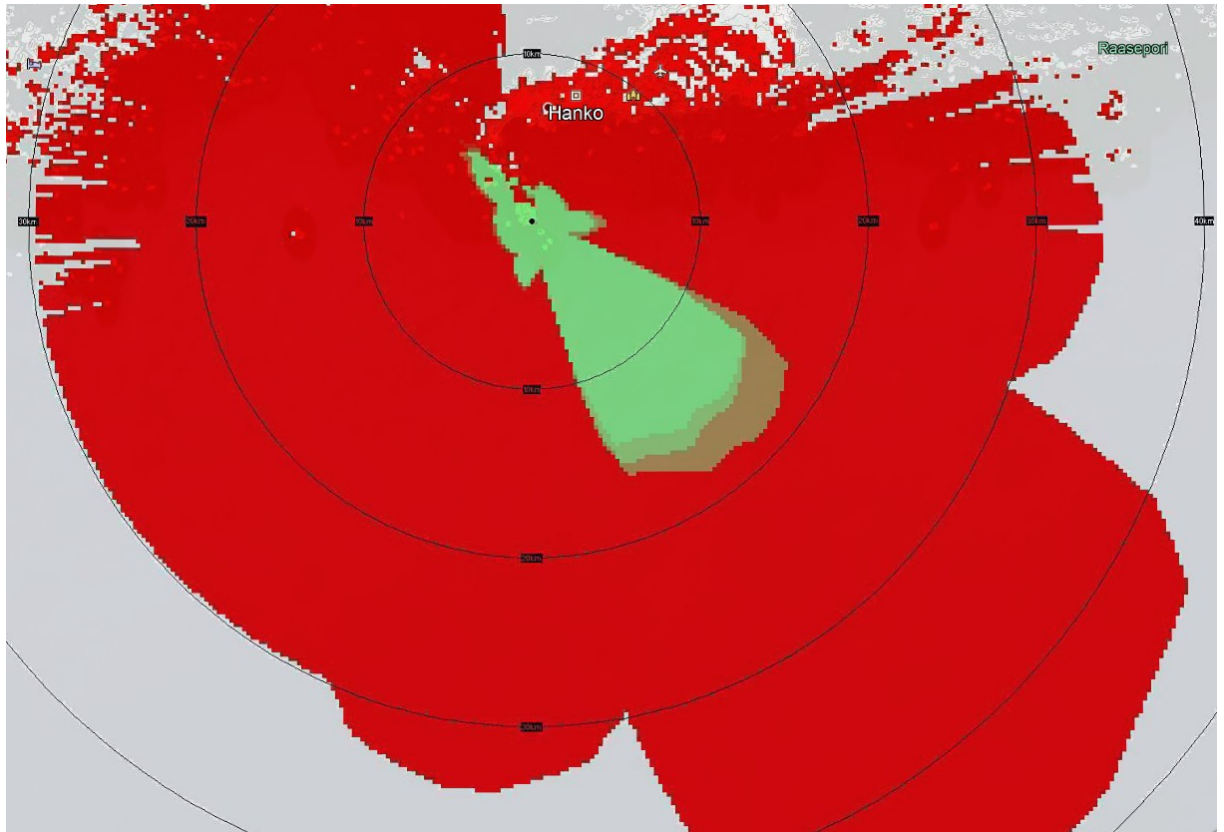
400 MHz Dipoliantenni			
	Etenemisvaimennus (dB)	Häirintäteho vastaanotimessa	Tehovertailu (dB)
200km	125,5	-70,5	32,5
100km	119,5	-67,5	35,5
50km	113,5	-58,5	44,5
400 MHz Dipoli-logperiodinen antenni			
	Etenemisvaimennus (dB)	Häirintäteho vastaanotimessa	Tehovertailu (dB)
200km	125,5	-70,5	32,5
100km	119,5	-67,5	35,5
50km	113,5	-58,5	44,5
2700 MHz Dipoliantenni			
	Etenemisvaimennus (dB)	Häirintäteho vastaanotimessa	Tehovertailu (dB)
200km	142,1	-87,1	15,9
100km	136,1	-81,1	21,9
50km	130,1	-78,1	24,9
2700 MHz Kytettävän keilan antenni			
	Etenemisvaimennus (dB)	Häirintäteho vastaanotimessa	Tehovertailu (dB)
200km	142,1	-76,1	37,9
100km	136,1	-70,1	43,9
50km	130,1	-64,1	49,9

Häirintätarkastelun tuloksista voidaan päätellä, että tarkastellun kaltainen häirintä lyhentää saatutettavaa maksimaalista yhteysväliä. Kytettävän keilan antennin tapauksessa maksimaalinen yhteysvälivaimennus pienenee voimakkaasti, koska häirinnän vaikutukseen on lisätty antennien vahvistukset. Todellisuudessa lentävän häirintälaitteen olisi vaikeaa kohdistaa häirintä jatkuvasti kapeakeilaisen suunta-antennin pääkeilaan. Sivukeilahäirinnän tapauksessa, jos oletetaan kytettävän keilan antennin sivukeilatasoksi -16dB maksimaalinen yhteysvälivaimennus kasvaa vastaavasti 16dB. Häirittävän kannalta tämä tarkoittaa noin 40 kertaa suurempaa tehoa kuin häirityissä olosuhteissa [3].

Seuraavaksi tarkastellaan häirinnän vaikutusta antennien maksimikantamaan simulaatio-ohjelmalla. Simulaattorin rajoitteista johtuen simulaatiot suoritettiin 50 km häirintäetäisyydeltä. Häirinnän kannalta mielenkiintoisin antenni tässä tarkastelussa on kytkettävän keilan antenni. Kytettävän keilan antennin tapauksessa häirintä suoritettiin pää- ja sivukeilan suunnassa sekä suoraan sivulta 50 km etäisyydeltä. Kuvissa 29 ja 30 esitetään tukiaseman kyky saavuttaa kaksisuuntainen yhteys Rauma- ja Jurmo-luokkiin 2700 MHz taajuudella taulukon 15 parametreilla. Kuvissa lyhin kantamakaari kuvaa pääkeilahäirinnän vaikutusta, keskimmäinen sivukeilahäirinnän vaikutusta ja pisin kohtisuoraan sivulta kohdistettua häirintää. Kuvissa vihreä väri kuvaa aluetta, jossa hyötysignaali on 3dB häirintäsignaalia voimakkaampi. Punainen alue kuvaa häirinnän vuoksi menetettyä kantamaa. Kytetyn keilan antennin säteilykuvio toteutettiin Excel-laskentaohjelmalla hyödyntäen lähteen 8 arvoja [8]. Säteilykuvion tuottamiseen tarvittava laskentaohjelma on saatavilla lähteessä 10 ja sen käyttö kuvataan liitteessä 4 [10].



Kuva 29: Kytettävän keilan antennin häirintätarkastelu häirittäessä tukiaseman ja Rauma-luokan ohjusveneen välistä yhteyttä 2700MHz taajuudella



Kuva 30: Kytettävän keilan antennin häirintätarkastelu häiritäessä tukiaseman ja Rauma-luokan ohjusveneen välistä yhteyttä 2700MHz taajuudella

Ilmasta suoritettu tukiaseman häirintä lyhentää yhteysvälejä kaikissa tapauksissa merkittävästi. Loput häirintätarkastelussa suoritettut simuloinnit ovat kuvattuna liitteissä 2 ja 3. Taulukossa 19 esitetään häirinnän vaikutus yhteysetäisyyksien pituuteen kilometreinä. Häiriöttömien yhteysvälien pituudet määritettiin tämän tutkimuksen alaluvuissa 3.5 ja 3.6.

Taulukko 19: Häirinnän vaikutus viestiyhteyden maksimipituuteen

400 MHz Dipoliantenni		
	Häiriötön yhteys	Häiritty yhteys
Tukiasema - Rauma	17 km	8 km
Tukiasema - Jurmo	29 km	13-15 km
400 MHz Dipoli-logperiodinen antenni		
	Häiriötön yhteys	Häiritty yhteys
Tukiasema - Rauma	20 km	9 km
Tukiasema - Jurmo	31 km	19 km
2700 MHz Dipoliantenni		
	Häiriötön yhteys	Häiritty yhteys
Tukiasema - Rauma	20 km	6-8 km
Tukiasema - Jurmo	15 km	5-8 km
2700 MHz Kytettävän keilan antenni		
	Häiriötön yhteys	Häiritty yhteys
Tukiasema - Rauma	37,5 km	18-25 km
Tukiasema - Jurmo	31,8 km	15-18 km

3.8. Yhteenveto

Edellisissä skenaarioissa on tutkittu eri antennien teoreettisia kantamia saaristo-olosuhteissa. Skenaarioista voidaan todeta, että antennin valinnalla on suuri vaikutus maksimikantamaan ja radiojärjestelmän suorituskykyyn. Molemmissa skenaarioissa suunta-antennien maksimikantamat ovat huomattavasti dipoliantenneja suuremmat. UHF III+ skenaariosta voidaan lisäksi havaita, että pienellä 5W lähetysteholla voidaan luoda pitkiäkin yhteyksiä, kun käytössä on voimakkaasti suuntaava antenni sekä tukiasemassa, että aluksessa. Suunta-antennien alttius häirinnälle ja häiriöille on pienempi kuin dipoliantennien, koska häiritsijä ei välttämättä edes havaitse pienellä teholla ja kapealla keilanleveydellä toimivia yksiköitä. Häirinnän toteutuessa kohtalaisen pienitehoinen 100 W häirintälähetin kykenee kuitenkin vaikuttamaan viestiyhteyksien pituuteen. Suunta-antennien suorituskyky häirityissä olosuhteissa realisoituu parhaiten NATO UHF III+ taajuusalueen tuloksista, joissa yhteysvälit olivat huomattavasti dipoliantenneja pidemmät.

4. JOHTOPÄÄTÖKSET

4.1. Johtopäätökset

Viestijärjestelmien monipuolistuminen ja siirtyminen korkeammille taajuuksille ei ole haastetta. Tarve korkeammalle tiedonsiirtokapasiteetille voidaan usein täyttää nostamalla taajuutta tai käyttämällä uudentyyppistä innovaatiota hyödyntäviä laiteratkaisuja. Lähes reaaliaikaisen tilannekuvan mahdollistavat jatkuvasti lähettävät ja vastaanottavat viestijärjestelmät luovat myös lisähaasteita järjestelmän suunnittelulle. Tämän tutkimuksen perusteella voidaan todeta, että suuntaavien antennijärjestelmien käytöllä voidaan saavuttaa huomattavasti pidempiä viestiyhteyksiä saaristo-olosuhteissa NATO UHF I ja III+ -taajuusalueilla. Ympärisäteilevien antennien lyhyet yhteysvälit korostuvat käytettäessä ympärisäteileviä antennoja pienillä lähetystehoilla etenkin NATO UHFIII+ taajuusalueella. Pieni lähetysteho vaikeuttaa järjestelmän havaitsemista ja sitä kautta suojaa järjestelmää ulkopuolisilta häiriöiltä ja häirinnältä. Seuraavaksi vastataan tutkimuskysymyksiin, joihin vastaamalla myös pääkysymykseen on vastattu.

1. Mitkä ovat tämänhetkiset tiedonsiirron rajoitteet NATO UHF I ja III+ -taajuusalueilla?

Tiedonsiirtokapasiteettia voidaan kasvattaa kasvattamalla kaistanleveyttä tai parantamalla signaali-kohinasuhdetta. Signaali-kohinasuhdetta voidaan parantaa herkemmillä vastaanottimilla, antenneilla joissa on suuri suhteellinen vahvistus tai suuremmilla lähetystehoilla. NATO UHF III+ -taajuusalueella signaali kohinasuhdetta laskee NATO UHF I-taajuusalueella voimakkaampi etenemisvaimennus, monitie-eteneminen ja häipyminen. NATO UHF III+ taajuusalueella maastoesteet vaimentavat signaalia voimakkaasti ja lähetys- ja vastaanottoantenneilla tulisi olla toisiinsa nähden lähes esteetön näkyvyys. Edellä mainittujen seikkojen lisäksi antennin korkeus vaikuttaa radiohorisontin kautta yhteysvälin pituuteen.

2. Voidaanko suuntaavien antennijärjestelmien käytöllä parantaa tiedonsiirtokapasiteettia NATO UHF I ja III+ taajuusalueilla?

Suunta-antenneja käyttämällä voidaan kasvattaa tiedonsiirtokapasiteettia molemmilla taajuusalueilla verrattuna ympärisäteileviin antenneihin, joiden vahvistus on suhteessa pienempi. Suunta-antenneja käyttämällä viestijärjestelmän linkkibudjetissa on enemmän ”pelivaraa” joko yhteysvälin pituuden kasvattamiseen tai häiriöiden ja häirinnän sietoon. Suuntaavien antennijärjestelmien käytöllä voidaan parantaa tiedonsiirtokapasiteettia molemmilla taajuusalueilla, koska yhteysvälin signaali-kohinasuhde kasvaa ympärisäteileviin antenneihin verrattaessa. Suuntaavat antennit vaativat kuitenkin joko mekaanisen suuntauskoneiston tai sähköisesti toteutetun keilanmuodostuksen toimiakseen. Mekaaniset suunta-antennit vaativat lisäksi huoltoa. Adaptiiviset antennit ja kytkettävän keilan antennit ovat houkuttelevia teknisiä ratkaisuja, joskin niiden vaatima suunnittelu ja kehitystyö tiettyyn toimintaympäristöön voi olla pitkä prosessi. Oman haasteensa suunniteluun asettaa liikkuvien alusten liikehdintä sekä keinunta ja jyskintä. Kytettävän keilan antennien toteutus aluskalustolle NATO UHF III+ -taajuusalueelle on jo mahdollista, kuten lähteessä 6 esiintyvistä antenniratkaisusta voidaan todeta [7].

3. Miten suuntaavien antennijärjestelmien käyttö vaikuttaa viestijärjestelmän maksimikantamaan häirintätilanteessa?

Viestijärjestelmää voidaan häiritä tarkoituksellisesti tai samalla taajuudella toimivat muut saman taajuuden radiolaitteet voivat aiheuttaa sille keskinäishäiriöitä. Suuntaavien antennijärjestelmien vahvuutena on niiden pienempi paljastumistodennäköisyys ympärisäteileviin antenneihin verrattuna. Mikäli järjestelmää ei kyetä paikantamaan, siihen on vaikeaa kohdistaa häirintää. Tässä tutkimuksessa tarkasteltiin tapausta, jossa häiritsijä on päässyt havaintoon ja vaikuttamaan kohinahäirinnällä tukiaseman vastaanottimeen. Suunta-antennien yhteysvälit lyhenivät häirinnän vaikutuksesta, mutta yhteysvälien kokonaispituudet olivat silti pidemmät kuin käytettäessä dipoliantenneja.

Yhteenvedona voidaan todeta, että suuntaavien antennijärjestelmien käytöllä voidaan parantaa Merivoimien viestijärjestelmien signaali-kohinasuhdetta NATO UHF I- ja III+ -taajuusalueilla. Haasteena suuntaavien antennien käytön lisäämiselle voidaan nähdä niiden kalliimpi hinta, matalilla taajuuksilla suuri fyysinen koko ja antennisijoittelun tuomat suunnitteluhaasteet.

Lopuksi haluan kiittää perhettäni, joka teki tämän tutkimuksen sekä mahdolliseksi, että ajoittain mahdolltomaksi.

4.2. Jatkotutkimusaiheet

Langattomien viestijärjestelmien simuloitu toiminta saariston olosuhteissa ei välttämättä vastaa täysin todellisuutta. Eri etenemismallit soveltuvat eri tavoin saariston kaltaiseen ympäristöön. Alusten liikkeen vaikutus suunta-antennien mahdolliseen suuntausvirheeseen ja antennien vaikuttaminen, joko mekaanisesti tai sähköisesti keilaavien antennien tapauksessa ohjelmallisesti, voisi olla mielenkiintoinen tutkimusaihe. Jatkotutkimusaiheet listattuna:

- Erilaisten etenemismallien vastaavuus Merivoimien toimintaympäristöön ja niiden vertailu.
- Suunta-antennien suuntausvirheen vaikutuksen analysointi ja suuntausvirheen minimoinnin keinot.
- Suunta-antennien hyödyntämisellä saavutettava viestijärjestelmän lisäkapasiteetin tarkempi analyysi.
- Suunta-antennien laajempi häirintätarkastelu käyttäen simuloitua liikettä ja antennien tarkkoja säteilykuvioita.

LÄHTEET

- [1] Adaptive antennas concepts and key technical aspects [Verkkajulkaisu]. ITU. 2004. [Viitattu 30.8.2017]. Saatavissa: https://www.itu.int/dms_pub/itu-r/opb/rep/R-REP-M.2040-2004-PDF-E.pdf
- [2] Aerial OY: Aerial OY verkkosivut [Viitattu 22.1.2018]. Saatavissa <http://aerial.fi/fi/>
- [3] ARRL. *A Tutorial on the Decibel*. [Viitattu 10.4.2018]. Saatavissa: <http://www.arrl.org/files/file/Instructor%20resources/A%20Tutorial%20on%20the%20Dec-N0AX.pdf>
- [4] ARRL. *The ARRL Handbook For Radio Communications*. Newington CT: ARRL, 2017. 1280 s. ISBN: 978-1-62595-062-8.
- [5] Balanis, Constantine A. *Antenna Theory and Analysis*. New Jersey: Jon Wiley & Sons inc., 2007. 1072 s. ISBN: 0-471-66782-X.
- [6] Bräysy, Timo.; Koskela, Timo. *Adaptiiviset antennit liikkuvissa sotilastietoliikennejärjestelmissä*. Julkaisusarjassa: Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta. Tutkimusraportti no.707. 2006. Helsinki: MATINE, 2006.
- [7] Cojot OY. Newsletter 10/2017 [Viitattu 11.1.2018]. Saatavissa: <http://newsletter.cojot.com/a/s/73722162-ee02cd37f1df49e84cacffa8a0d828f6/2102871>
- [8] Cojot OY. *SBA1327B Data Sheet*. Newsletter 11/2017 [Viitattu 11.1.2018] Saatavissa: http://newsletter.cojot.com/a/f/73722162-def3dd220f4b05a9026118669e901c20/2212972/7a99fcbc1f24854a1bc21d2d7d370b4e/cojot_sba1327b_v0.1w.pdf
- [9] Coudé, Robert. *Radio Mobile*. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 8.1.2018]. Saatavissa: <http://www.ve2dbe.com/english1.html>
- [10] G3TVU: *Radio Mobile 'Quick Start'*. [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 10.1.2018]. Saatavissa: http://www.g3tvu.co.uk/Quick_Start.htm
- [11] IEEE. *Transactions on Antennas and Propagation vol 17 issue 1*: New York: The Institute of Electrical and Electronics Engineers inc., 1969. 693 s. ISSN: 1558-2221.
- [12] Forsby, Visa. *Antennijärjestelmän optimointi*. YAMK lopputyö. Helsinki, 2016. Metropolia AMK, automaatioteknologia. 46 s.

- [13] Hourani, Hafeth. *An Overview of Adaptive Antenna Systems*. Helsinki University of Technology: Communications lab, 2004. [Viitattu 11.1.2018]. Saatavissa: http://www.comlab.hut.fi/opetus/333/2004_2005_slides/Adaptive_antennas_text.pdf
- [14] Hovinen, V.; Hämäläinen, M.; Leppänen, P. *VHF/UHF-alueen radiokanavamallien mittaaminen ja kehittäminen Merivoimien käyttöön*. Julkaisusarjassa: Maanpuolustuksen tieteellinen neuvottelukunta. Raporttisarja B 1999/6. Helsinki: MATINE, 1999. ISBN: 951-25-1051-0.
- [15] Institute for Telecommunication Sciences. *Irregular Terrain Model (ITM)*. [Viitattu 12.2.2018] Saatavissa: <https://www.its.bldrdoc.gov/resources/radio-propagation-software/itm/itm>
- [16] Johnson, Richard C. *Antenna Engineering Handbook 3rd edition*. New York: McGraw-Hill inc., 1993. 1512 s. ISBN: 0-07-032381-X.
- [17] Kari, M., Hakala, A., Pääkkönen, E. & Pitkänen, M. *Sotatekninen arvio ja ennuste 2025, STAE 2025 Osa 1*. Helsinki: Edita Prima Oy, 2008. 564 s. ISBN 978-951-25-1888-3.
- [18] Kasampalis, S.; Lazaridis, P; Zaharis, Z.; Bizopoulos, A.; Zettas, S.; Cosmas, J.: *Comparison of Longley-Rice, ITU-R P-1546 and Hata-Davidson models for DVB-T Coverage Prediction*. Julkaisussa: The IEEE International Symposium on Broadband Multimedia Systems and Broadcasting. 2014. ISBN: 978-1-4799-1654-2.
- [19] Kosola, Jyri; Jokinen, Janne. *Elektroninen sodankäynti osa 1 – Taistelun viides dimensio*. Julkaisusarjassa: Maanpuolustuskorkeakoulu, Tekniikan laitos. Julkaisusarja 5 no 2. Helsinki: Edita Prima OY, 2004. ISBN: 951-25-1554-7.
- [20] Kosola, Jyri; Solante, Tero. *Digitaalinen taistelukenttä –informaatioajan sotakoneen tekniikka*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, Sotatekniikan laitos, 2013. 497 s. ISBN: 978-951-25-2503-4.
- [21] Lindell, I. *Radioaaltojen eteneminen*. 5. painos. Helsinki: Hakapaino Oy, 2000. 261 s. ISBN 951-672-227-X
- [22] Metteri, Jussi. *Kvantitatiiviset tutkimusmenetelmät operaatiotaidon ja taktiikan tutkimuksessa*. Helsinki: Maanpuolustuskorkeakoulu, taktiikan laitos, julkaisusarja 2, n:o 1. 2006. 134 s. ISBN: 951-25-1713-2.
- [23] PE1MEW: *Radio Mobile – RF propagation simulation software* [Verkkajulkaisu]. [Viitattu 12.1.2018]. Saatavissa: <http://radiomobile.pe1mew.nl/>

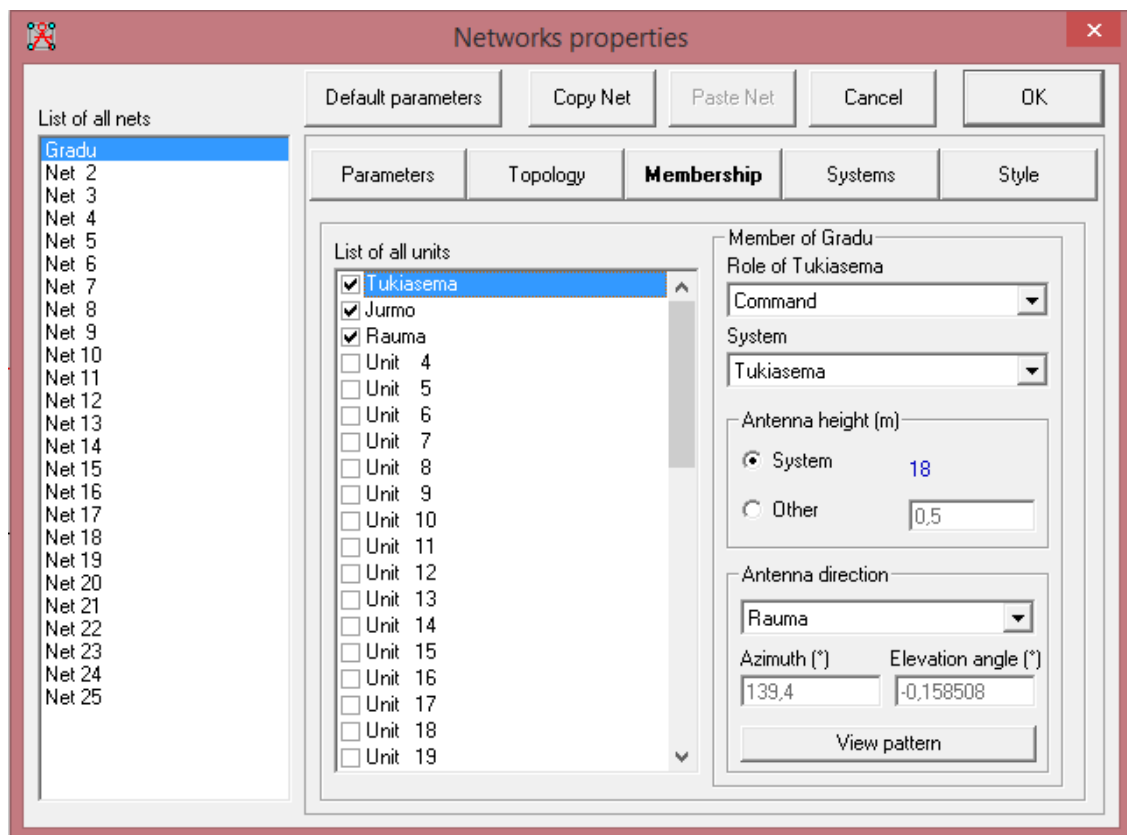
- [24] Phillips, C.; Sicker, D.; Grunwald, D: *The Stability of the Longley-Rice Irregular Terrain Model for Typical Problems*. University of Colorado. Computer Science Technical Reports. 2011. [Viitattu 4.2.2018]. Saatavissa: https://scholar.colorado.edu/cgi/viewcontent.cgi?referer=https://www.google.com/&httpsredir=1&article=2014&context=csci_techreports
- [25] Pihlaja, Veli. *Älyantennien käyttömahdollisuuksia sotilasradioverkoissa*. AMK lopputyö. Helsinki, 2015. Metropolia AMK, tietotekniikka. 42 s.
- [26] Rani, J.; Surayamubeen P. *Smart Antennas for Communications in Line of Sight*. International Journal of Innovative Research in Computer and Communications engineering. 2015. Vol. 3. Issue 3. [viitattu 22.2.2018]. Saatavissa: http://www.ijircce.com/upload/2015/march/79_21_SMART.pdf
- [27] Radio Mobile – RF Propagation Simulation Software [Verkkójulkaisu]. [Viitattu 12.1.2018]. Saatavissa: <http://radiomobile.pe1mew.nl/>
- [28] Rhode & Schwarz: *HKO 14 Antennin parametreja* [viitattu 21.1.2018]. Saatavissa http://manualzz.com/doc/11861415/rohdeandschwarz_hk014_vhf-uhf_coaxial_dipole_broch
- [29] Radio Regulations. [Verkkójulkaisu] ITU:2012. [Viitattu 28.8.2017]. Saatavissa https://www.itu.int/dms_pub/itu-s/oth/02/02/S02020000244501PDFE.PDF
- [30] Räisänen, Antti; Lehto Arto. *Radiotekniikan perusteet*. Helsinki: Otatieto Oy, 2001. 287 s. ISBN: 9789516723375.
- [31] Tikkanen, Jussi, Rauma-luokan antennit. Turku 15.1.2015, Rannikkolaivasto. PGG Porvoon viestikoulutusmateriaali. Materiaali tutkijan hallussa
- [32] Tuukkanen, Topi; Anteroineen, Jukka. *Initial Assessment of Proposed Cognitive Radio Features from a Military Perspective*. In: CCRP 18th Command and Control Research and Technology symposium. Alexandria, Virginia, USA, 19.-21.6.2013.
- [33] Tuukkanen, Topi; Pouttu, Ari; Leppänen, Pentti. *Finnish Software Radio Programme*. Oulun yliopisto, 2003. 66 s. ISBN: 951-42-7187-4.
- [34] Volakis, John. *Antenna Engineering Handbook, 4th edition*. New York: McGraw-Hill Education, 2007. 1755 s. ISBN: 9780071475747.
- [35] Widrow, B.; Mantley, P.; Griffiths, L.; Goode, B. *Adaptive Antenna Systems*. Proceedings of the IEEE, 1967. Vol 55, no 2, p.1. ISSN: 1558-2256.
- [36] Zooghyby, Ahmed. *Smart Antenna Engineering*. Norwood: Artech House, 2005. 348 s. ISBN: 1-58053-515-1.

LIITTEET

Liite 1	SIMULAATIO OHJELMAN TYÖKALUT	6 sivua
Liite 2	HÄIRINTÄTARKASTELU 400 MHZ	2 sivua
Liite 3	HÄIRINTÄTARKASTELU 2700 MHZ	2 sivua
Liite 4	SÄTEILYKUVION LUOMINEN EXCEL:LLA	1 sivu

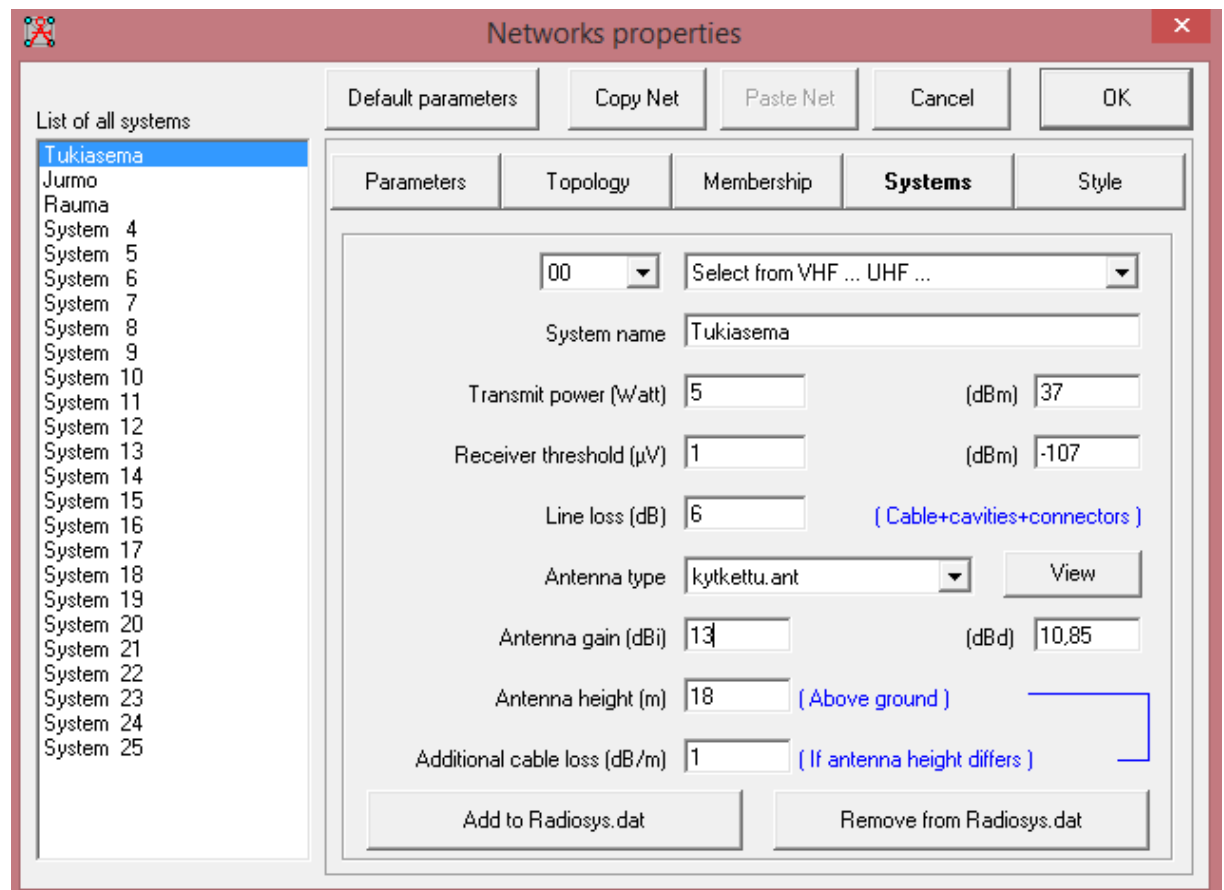
SIMULAATIO-OHJELMAN TYÖKALUT

Tässä liitteessä esitetään Radio Mobile simulaatio-ohjelmaan asetetut keskeiset parametrit. Parametreja muutettiin skenaarioiden taulukoiden mukaisesti. Kuvassa L1.1 esitetään Radio Mobilen verkkosuunnitteluun tarkoitettu työkalu. Antennien suuntaus- ja korkeusparametrit ovat vapaasti muutettavissa.



Kuva L1.1 Radio Mobilen verkkosuunnittelutyökalu

Kuvassa L1.2 esitetään Radio Mobile simulaatio-ohjelman Systems-valikko, johon asetetaan laitteiden parametreja. Antennityypin valinta mahdollistaa oletusantennien ja itse luotujen säteilykuvioiden käyttämisen simulaatioissa.



Kuva L1.2 Radio Mobilen Systems-valikko

Kuvassa L1.3 esitetään Radio Mobile simulaatio-ohjelman parametrisivu, jonka kautta asetaan haluttu taajuus, polarisaatio ja ympäristömuuttujat.

Networks properties

List of all nets

- Gradu
- Net 2
- Net 3
- Net 4
- Net 5
- Net 6
- Net 7
- Net 8
- Net 9
- Net 10
- Net 11
- Net 12
- Net 13
- Net 14
- Net 15
- Net 16
- Net 17
- Net 18
- Net 19
- Net 20
- Net 21
- Net 22
- Net 23
- Net 24
- Net 25

Default parameters Copy Net Paste Net Cancel OK

Parameters Topology Membership Systems Style

Net name: Gradu

Minimum frequency (MHz): 2700

Maximum frequency (MHz): 2700

Polarization: ☐ Vertical ☒ Horizontal

Mode of variability: ☒ Spot (% of time: 50) ☐ Accidental (% of locations: 50) ☐ Mobile (% of situations: 70) ☐ Broadcast

Surface refractivity (N-Units): 301

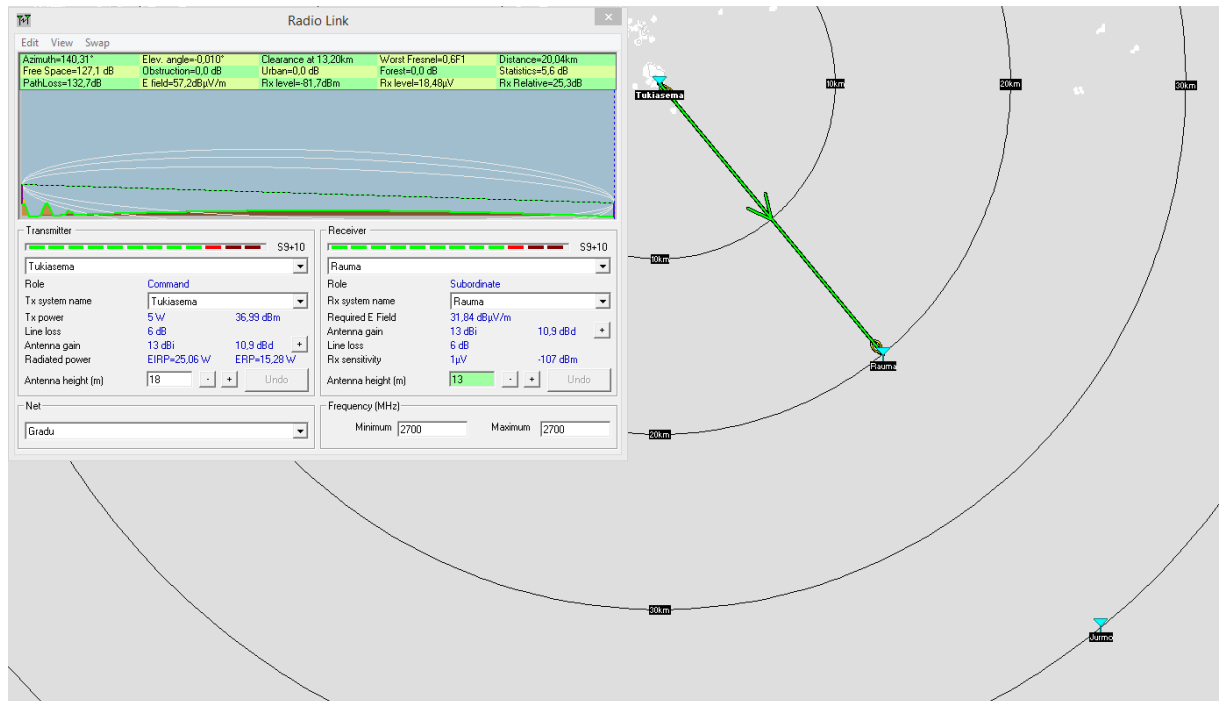
Ground conductivity (S/m): 0.5

Relative ground permittivity: 25

Climate: ☐ Equatorial ☐ Continental sub-tropical ☐ Maritime sub-tropical ☐ Desert ☐ Continental temperate ☐ Maritime temperate over land ☒ Maritime temperate over sea

Kuva L1.3 Radio Mobilen Parameters-valikko

Kuvassa L1.4 esitetään Radio Mobile simulaatio-ohjelman linkkianalyysityökalu. Linkkianalyysityökalua käytettiin tässä tutkimuksessa lähinnä varmistamaan yhteysvälivaimennuksen toteutuminen siirtämällä aluslavetti yhteysvälivaimennuksen rajalla olevalle alueelle.



Kuva L1.4 Radio Mobilen linkkianalyysityökalu

Kuvassa L1.5 esitetään Radio Mobile simulaatio ohjelman kantamien määrittämiseen tarkoitettu Polar Radio coverage-työkalu. Työkalun avulla määritettiin valikoitujen antennien maksimikantamat pienimmän sallitun vastaanottotehon määrittämisen jälkeen.

Single polar Radio coverage

Centre unit: Tukiasema

Mobile unit: Rauma

Network: Gradu

Draw

Cancel

Link Direction

☐ Centre Tx - Mobile Rx

☐ Centre Rx - Mobile Tx

☒ Worst case

Radial range (km)

Minimum: 0,01

Maximum: 100

Plot

☒ Contour line

☒ Fill area

☐ Solid

☐ Network style

☐ Rainbow

☐ Blur

☒ Complete.wav

Color

Color

Azimuth range (°)

Minimum: 0

Maximum: 360

Step: 1

Antenna pattern

☒ Use network antenna settings

kytkettu.ant

Azimuth (°): 139,4

Elevation angle (°): -0,158508

View pattern

☒ Draw background

☐ Draw

☒ Small

Threshold

☐ S-Unit

☒ dBm

☐ µV

☐ dBµV/m

Auto set

From: -114,0

To: -114,0

Save coverage data (TXT)

Kuva L1.5 Radio Mobilen Polar Coverage-valikko

Kuvassa L1.6 esitetään häirintätarkastelussa käytetty Radio Mobile simulaatio-ohjelman työkalu. Häirintä toteutettiin sijoittamalla häiritsevä yksikkö 50km etäisyydelle. Häiritsevän yksikön parametrit asetettiin häirintätarkastelun mukaiseksi. Häirintätarkasteluiden suorittaminen vaatii tietokoneelta melkoista laskentatehoa, koska viiden pikselin tarkkuudella yksittäisen laskennan suorittamiseen kului noin 15 minuuttia.

Interference Radio coverage

Coverage based on: required Signal to Interference ratio (S/I) or acceptable time delay

☐ S-Unit
☒ dBm
☐ µV
☐ dBµV/m

Minimum Signal (>=) : -114,0

Minimum S/I (dB) : 3

Draw size (pixels) : 5

☒ Color
☐ No color

☐ Time delay
☒ Required S/I is met
☐ Required S/I is not met
☐ Minimum signal is not met

Mode: ☒ All picture ☐ Selection

Wanted
 Tx Unit: Tukiasema
 Antenna pattern: kytettu.ant
 Azimuth (°): 139,4485
 Elevation angle (°): -0,158508
☐ Draw pattern
 View pattern

Interferer
 Tx Unit: Jurmo
 Antenna pattern: omni.ant
☐ Draw pattern
 View pattern

Swap

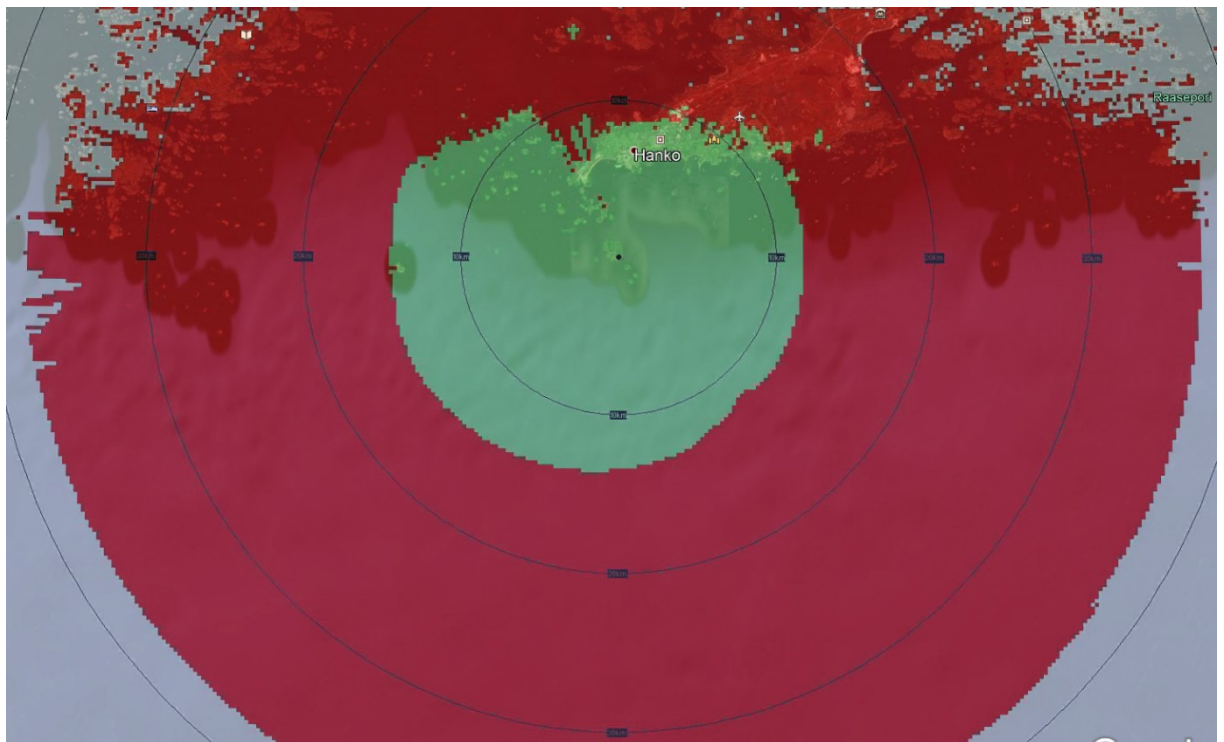
Mobile
 Mobile Rx Unit: Rauma
 In network: Gradu
 1 common net(s)
☒ Use network antenna settings
☒ Draw background
☒ Small
☐ Solid

Draw Cancel

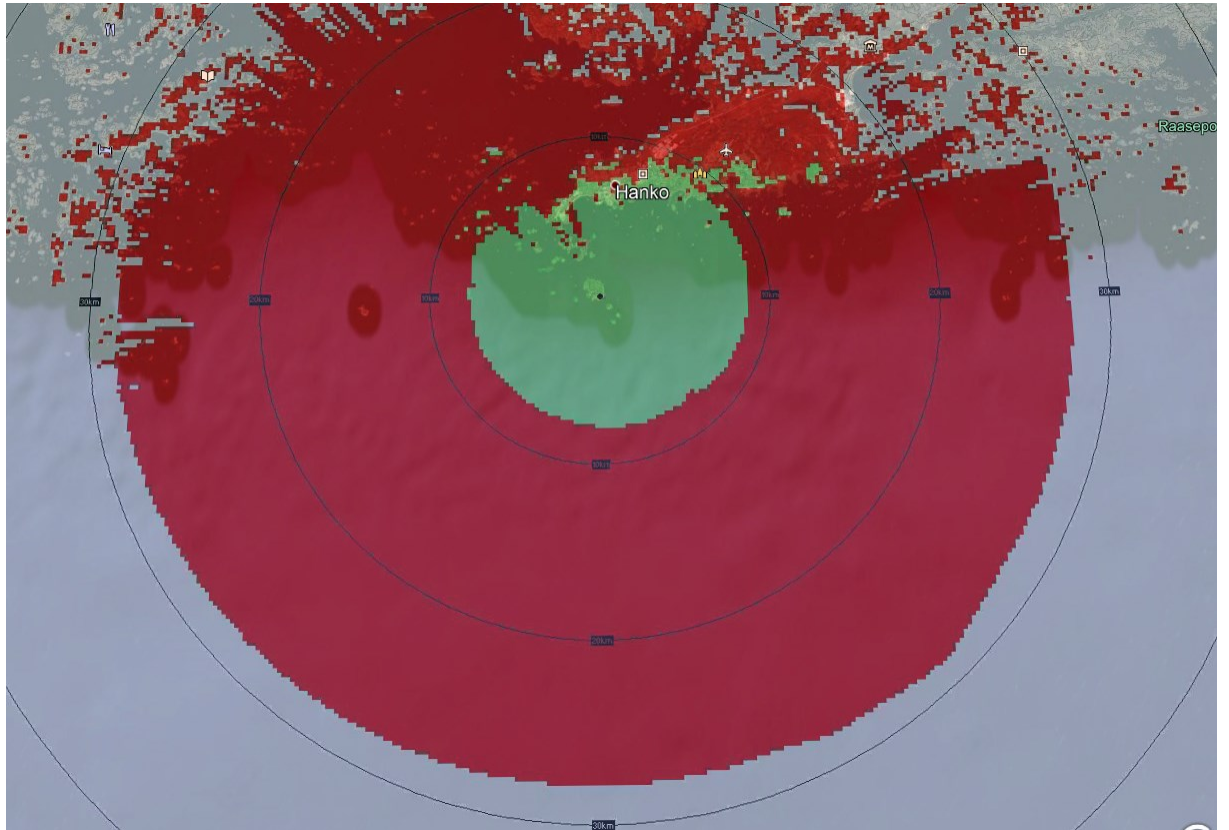
Kuva L1.5 Radio Mobilen Interference Radio Coverage-valikko

HÄIRINTÄTARKASTELU 400 MHZ

Tässä liitteessä esitetään kuvat häirinnän vaikutuksesta tukiasemaan käytettäessä alaluvun 3.7 parametreja. Kuvissa L2.1 ja L2.2 esitetään Rauma- ja Jurmo-luokkien yhteysvälit häirinnän vaikutuksen alaisena 400 MHz taajuudella. Vihreä väri kuvaa aluetta, jossa hyötysignaalin voimakkuus on vähintään 3 dB suurempi kuin häirinnän voimakkuus



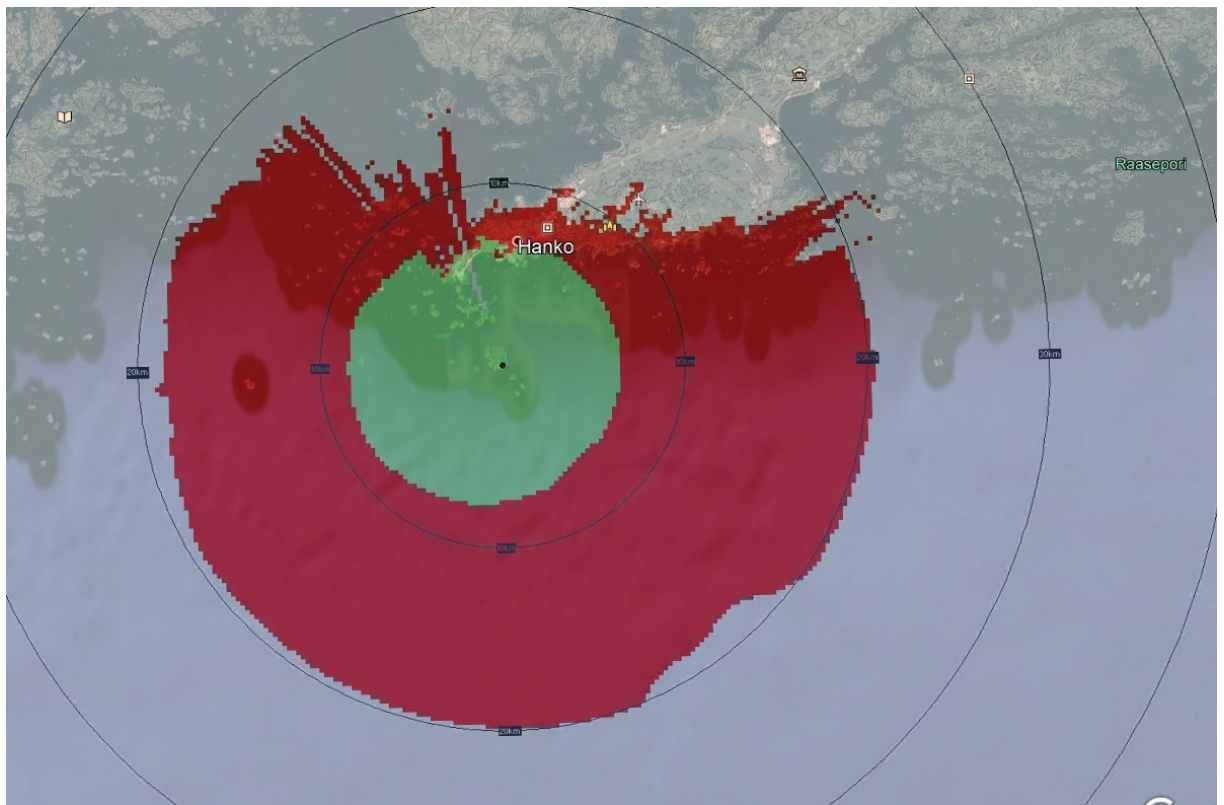
Kuva L2.1 Tukiaseman kyky saavuttaa viestiyhteys Rauma-luokan ohjusveneen kanssa häirityissä olosuhteissa 400 MHz taajuudella käytettäessä dipoliantenneja



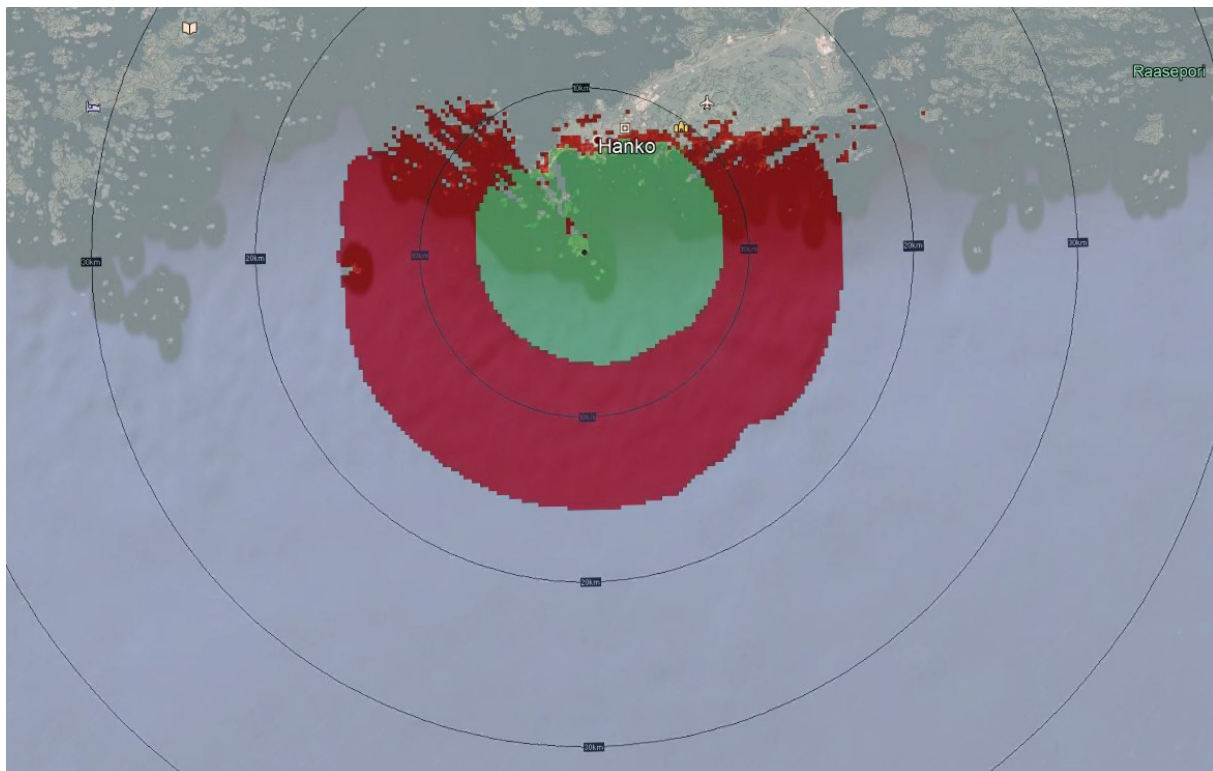
Kuva L2.2 Tukiaseman kyky saavuttaa viestiyhteys Jurmo-luokan maihinnousuveneiden kanssa häirityissä olosuhteissa 400 MHz taajuudella käytettäessä dipoliantenneja

HÄIRINTÄTARKASTELU 2700 MHZ

Tässä liitteessä esitetään kuvat häirinnän vaikutuksesta tukiasemaan käytettäessä alaluvun 3.7 parametreja. Kuvissa L3.1 ja L3.2 esitetään Rauma- ja Jurmo-luokkien yhteysvälit häirinnän vaikutuksen alaisena 2700 MHz taajuudella. Vihreä väri kuvaa aluetta, jossa hyötysignaalin voimakkuus on vähintään 3 dB suurempi kuin häirinnän voimakkuus



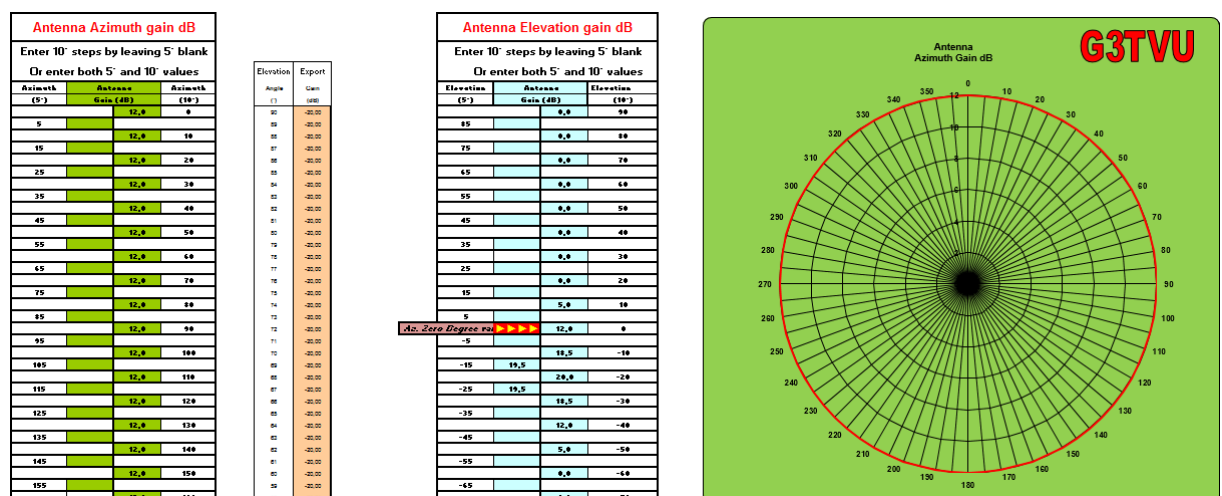
Kuva L3.1 Tukiaseman kyky saavuttaa viestiyhteys Rauma-luokan ohjusveneeseen kanssa häirityissä olosuhteissa 2700 MHz taajuudella käytettäessä dipoliantenneja



Kuva L3.2 Tukiaseman kyky saavuttaa viestiyhteys Jurmo-luokan maihinnousuveneeseen kanssa häirityissä olosuhteissa 2700 MHz taajuudella käytettäessä dipoliantenneja

SÄTEILYKUVION LUOMINEN EXCEL:LLA

Häiriötarkasteluun luotiin kytkettävän keilan antennille säteilykuvio, joka mukailee lähteen 8 tietoja [8]. Antennin säteilykuvion luomiseen tarkoitettu Excel laskentaohjelma on lähteestä 10 [10]. Laskentaohjelmassa on mahdollista toteuttaa säteilykuvio sekä vertikaali- että horisontaalitasossa. Säteilykuvio syötetään laskentaohjelmaan 10° tai 5° välein. On huomioitava, että tähän tutkimukseen toteutettu säteilykuvio on melko karkea arvio todellisen antennin säteilykuvioista. Kuvassa L4.1 esitetään säteilykuvion luomiseen käytetty Excel-laskentaohjelma.



Kuva L4.1 Säteilykuvion luomiseen tarvittava Excel-laskentaohjelma